

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas
de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE LA FIABILIDAD MEDIANTE
ENSAYOS ACELERADOS DE DIODOS
ULTRAVIOLETA DE ALTA POTENCIA

César Segura Antúnez
Julio 2014



E.T.S.I.S. TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

TEMA: Ensayos acelerados sobre diodos LEDs ultravioleta

TÍTULO: Estudio de la fiabilidad mediante ensayos acelerados de diodos ultravioleta de alta potencia

AUTOR: César Segura Antúnez

TUTOR: Manuel Vázquez López Vº Bº.

DEPARTAMENTO: ELECTRÓNICA FÍSICA ▼

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: David Luengo García

VOCAL: Manuel Vázquez López

VOCAL SECRETARIO: Neftalí Núñez Mendoza

DIRECTOR:

Fecha de lectura: 18 de Julio de 2014

Calificación: El Secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

Durante los últimos años la utilización de los LEDs (Light Emitting Diodes) ha aumentado de forma muy importante siendo hoy en día una alternativa real a los sistemas de iluminación tradicionales. La iluminación basada en LEDs se está utilizando ampliamente en automoción, arquitectura, aplicaciones domésticas y señalización debido a su alta fiabilidad, pequeño tamaño y bajo consumo.

La evaluación de la fiabilidad de los LEDs es un tema clave previo a la comercialización o a la puesta en marcha del LED en una nueva aplicación. La evaluación de la fiabilidad de dispositivos requiere ensayos acelerados para obtener resultados de fiabilidad en un periodo de tiempo aceptable, del orden de pocas semanas.

En éste proyecto se estudia la fiabilidad de dos tipos diferentes de LEDs ultravioleta, que pueden sustituir a las lámparas UV convencionales, para diferentes condiciones de trabajo y diferentes condiciones ambientales. Se hace un seguimiento de la evolución de los LEDs UV durante cientos de horas de ensayos acelerados para obtener resultados y conclusiones acerca de la degradación que sufren.

DEDICADO

A mis padres y a mi hermano.

Gracias por haber confiado siempre en mí.

AGRADECIMIENTOS

Ha sido difícil llegar hasta el final, nunca veía el día y ya creo que si ha llegado.

Los comienzos fueron muy duros pero el haber conseguido llegar hasta “este final” ha sido un momento dulce.

Agradecer a mis padres Juan y Mari Cruz todo el apoyo que me han dado tanto en los buenos como en los malos momentos y por supuesto el haberme permitido llegar hasta aquí.

A mi hermano Daniel por toda su ayuda y apoyo durante toda mi vida.

A D. Manuel Vázquez por haber apostado por mí desde el principio y por toda su ayuda y conocimientos que me ha enseñado. Gracias por este sprint final.

A D. Neftalí Núñez por haberme enseñado a que trabajar y divertirse es una maravilla.

A D. Francisco José Arqués por haberme dejado participar en su venidera tesis doctoral.

También a Paco por haberme echado una mano en el laboratorio.

Ha sido un placer poder realizar el proyecto con vosotros.

Quiero acordarme de todos los amigos que he conocido durante todos estos años y que por supuesto espero seguir viendo durante toda mi vida. A todos los que hemos hecho escapadas de vacaciones y he podido convivir con vosotros fuera de las clases y laboratorios. A los que hemos podido compartir momentos en el fútbol. A los que nos conocimos en Leeds. Y a los amigos de toda la vida. No me quiero olvidar especialmente de Jorge y Alfon de quienes siento admiración y he recibido tanta atención, con vosotros aprendí el valor del rigor para poder llegar hasta el final.

No quiero olvidarme de mi familia y de mis abuelos, quienes hubieran querido ver tanto este momento, incluso más que yo, especialmente a tí, yaya.

Gracias a todos de corazón.

RESUMEN

Durante los últimos años la utilización de los LEDs (Light Emitting Diodes) ha aumentado de forma muy importante siendo hoy en día una alternativa real a los sistemas de iluminación tradicionales.

La iluminación basada en LEDs se está utilizando ampliamente en automoción, arquitectura, aplicaciones domésticas y señalización debido a su alta fiabilidad, pequeño tamaño y bajo consumo.

La evaluación de la fiabilidad de los LEDs es un tema clave previo a la comercialización o a la puesta en marcha del LED en una nueva aplicación. La evaluación de la fiabilidad de dispositivos requiere ensayos acelerados para obtener resultados de fiabilidad en un periodo de tiempo aceptable, del orden de pocas semanas.

En éste proyecto se estudia la fiabilidad de dos tipos diferentes de LEDs ultravioleta, que pueden sustituir a las lámparas UV convencionales, para diferentes condiciones de trabajo y diferentes condiciones ambientales. Se hace un seguimiento de la evolución de los LEDs UV durante cientos horas de ensayo acelerado para obtener resultados y conclusiones acerca de la degradación que sufren.

La memoria del proyecto fin de carrera se ha estructurado en siete capítulos. Tres de ellos son teóricos, otros tres prácticos y finalmente uno sobre el presupuesto.

El primero explica la introducción y la evolución del diodo LED, el segundo introduce la fiabilidad explicando los modelos más utilizados para analizar los ensayos y el tercero es un breve tema acerca de los ensayos acelerados.

Los otros tres capítulos son orientados a los experimentos realizados en este Proyecto Fin de Carrera. Uno trata sobre la descripción del ensayo acelerado realizado, otro analiza los resultados obtenidos, el siguiente analiza las conclusiones y el último el presupuesto.

ABSTRACT

For the last years, the use of LEDs (Light Emitting Diodes) has increased significantly, being nowadays a real alternative to traditional lighting systems.

Lighting based on LEDs is being extensively used in automotive, domestic applications and signaling due to its high reliability small size and low power consumption.

The evaluation of LEDs reliability is a key issue before marketing or launching a new application. The reliability evaluation of devices requires accelerated tests to obtain reliability results in an acceptable period of time, for the order of few weeks.

In this project the reliability of two different types of UV LEDs, which can replace conventional UV lamps for different conditions and different environmental conditions is studied. The evolution of LEDs UV is tracked during hundred hours of accelerated test to obtain the results and conclusions about the degradation suffered.

The memory of the final project has been structured into seven chapters. Three of them are theoretical another three are experimental and the last one about estimates.

The first explains the introduction and development of LED, the second introduces the reliability explaining the most used models to analyze the tests and the third is a brief topic about the accelerated tests.

The other three chapters are oriented to the experiments done in this PFC. One explains the description of the accelerated test we have done, another analyzes the results obtained, the following one exposes the conclusions and the last one the estimates.

INDICE

INTRODUCCION.....	12
INTRODUCTION.....	13
1 EL DIODO LED.....	14
1.1 Funcionamiento.....	15
1.2 Simbología.....	16
1.3 Composición.....	16
1.3.1 Tabla característica de diodos LED.....	
1.4 Diodos de alta luminosidad.....	17
1.5 Diodo Ultravioleta.....	18
1.6 Radiación Ultravioleta.....	18
1.7 Fenómeno de la fluorescencia.....	19
1.8 Aplicaciones LED UV.....	20
1.9 CONCLUSIONES CAPITULO 1.....	22
2 INTRODUCCION A LA FIABILIDAD.....	23
2.1 Fallo catastrófico.....	25
2.2 Fallo por degradación.....	25
2.3 Análisis de datos de supervivencia.....	25
2.3.1 Funciones asociadas.....	
2.3.1.1 Función de fiabilidad o supervivencia.....	
2.3.2 Tasa de fallos.....	
2.3.2.1 Tipo de función de la tasa de fallos.....	
2.4 Modelo de la curva de la bañera o “bathtube curve”.....	26
2.5 Tiempo medio hasta el fallo (MTTF).....	27
2.6 Modelos de distribución utilizados en fiabilidad.....	27
2.6.1 Modelo de distribución normal.....	
2.6.2 Modelo de distribución lognormal.....	
2.6.3 Modelo de distribución exponencial.....	
2.6.4 Modelo de distribución de Weibull.....	
2.6.4.1 Modelo matemático.....	
2.6.4.2 Influencia del parámetro β	
2.6.4.3 Influencia del parámetro η	
2.6.4.4 Influencia del parámetro γ	
2.6.4.5 Evaluación de los parámetros de Weibull.....	
2.7 CONCLUSIONES CAPITULO 2.....	39
3 ENSAYOS DE FIABILIDAD.....	40
3.1 Clases de ensayos de fiabilidad.....	41
3.2 Modelo de aceleración en temperatura de Arrhenius.....	42
3.3 Ensayos acelerados de vida.....	43
3.3.1 Ensayos cualitativos.....	
3.3.2 Ensayos cuantitativos.....	
3.3.2.1 Método de tasa de aceleración.....	
3.3.2.2 Aceleración por sobreesfuerzo.....	
3.3.2.3 Análisis de datos.....	
3.3.3 Niveles de esfuerzo.....	
3.3.3.1 Independientes del tiempo.....	
3.3.3.2 Dependientes del tiempo.....	

3.4 Planificación de ensayos acelerados.....	46
3.5 CONCLUSIONES CAPITULO 3.....	47
4 DESCRIPCION DEL ENSAYO.....	48
4.1 Metodología del ensayo.....	49
4.2 Banco de pruebas.....	51
4.2.1 Mecanizado de los diodos UV.....	
4.2.2 Mecanizado del soporte de Aluminio.....	
4.3 Hornos de ensayo.....	56
4.4 Instrumentación Hardware.....	59
4.4.1 Instrumentación hardware puesto 1.....	60
4.4.1.1 Tarjeta de adquisición de datos KEITHLEY 7700.....	
4.4.1.2 Fuente de alimentación dual FAC 66-2B.....	
4.4.1.3 Tarjeta de relés.....	
4.4.1.4 USB 6501 de National Instruments.....	
4.4.1.5 Interfaz de comunicaciones GPIB.....	
4.4.1.6 Fuente de Alimentación dual TTI EX354D.....	
4.4.2 Instrumentación hardware puesto 2.....	66
4.4.2.1 Fuente de alimentación XANTREX XOL 35-510.....	
4.4.2.2 Espectrómetro Mightex SSE 1304 U.....	
4.4.2.3 Multímetro AGILENT 34410.....	
4.4.2.4 Cámara MOTICAM 2000.....	
4.4.2.5 Ordenadores.....	
4.4.3 Software.....	71
4.4.3.1 Labview.....	
4.4.3.1.1 Gesusuario.....	
4.4.3.1.2 LZ100UV00.....	
4.4.3.2 Mightex Spectrometer.....	
4.4.3.3 Motic Images Plus 2.0.....	
4.5 CONCLUSIONES CAPITULO 4.....	81
5 RESULTADOS.....	82
5.1 Curvas I-V.....	83
5.2 Espectrometría de los LEDs.....	90
5.3 Microscopia óptica.....	99
5.4 CONCLUSIONES CAPITULO 5.....	106
6 CONCLUSIONES.....	107
7 PRESUPUESTO.....	110

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1.....14-22

Figura 1.1: Regiones del diodo LED.....	
Figura 1.2: Bandas de conductor y de valencia.....	
Figura 1.3: Encapsulado de un diodo convencional.....	
Figura 1.4: Símbolo del diodo LED en el diseño electrónico.....	
Figura 1.5: Tabla característica para clasificar el material del LED con long. de onda.....	
Figura 1.6: Semáforo LED.....	
Figura 1.7: Alumbrado LED.....	
Figura 1.8: Espectro ultravioleta en nanómetros (nm) y luz visible.....	
Figura 1.9: Ejemplo de fluorescencia observada sobre un papel.....	
Figura 1.10: Lámpara para la autenticidad de billetes o cualquier otro documento verificable por luz UV...	
Figura 1.11: Diodo LED UV.....	

CAPITULO 2.....23-39

Figura 2.1: Representación gráfica de la curva de la bañera.....	
Figura 2.2: Función de densidad Normal.....	
Figura 2.3: Función de densidad Lognormal.....	
Figura 2.4: Función de distribución Normal.....	
Figura 2.5: Función de densidad para valores de λ	
Figura 2.6: Función de distribución para valores de λ	
Figura 2.7: Función de densidad en función del parámetro β	
Figura 2.8: Gráfica de la β en la función de distribución.....	
Figura 2.9: Gráfica de la β en función de la fiabilidad.....	
Figura 2.10: Gráfica de la β en función de la tasa de fallos.....	
Figura 2.11: Fiabilidad en función de η	
Figura 2.12: Fiabilidad en función de γ	
Figura 2.13: Ejemplo trazado Weibull.....	

CAPITULO 4.....48-81

Figura 4.1: Esquema de la planificación del ensayo durante el laboratorio.....	
Figura 4.2: Tipo I de LED UV.....	
Figura 4.3: Tipo II de LED UV.....	
Figura 4.4: Diodo Tipo I con sustrato.....	
Figura 4.5: Diodo Tipo II con sustrato.....	
Figura 4.6: Perfil de soldadura para el tipo I de diodo.....	
Figura 4.7: Perfil de soldadura para el tipo II de diodo.....	
Figura 4.8: Soldadura de cables sobre diodo.....	
Figura 4.9: Aspecto físico del disipador térmico de cada diodo.....	
Figura 4.10: Aspecto físico final de un diodo LED con disipador.....	
Figura 4.11: Conjunto de LEDs con disipador y sistema de conexiones empleado para el horno de 60°C...	
Figura 4.12: Aspecto del soporte de aluminio junto a un LED ya montado con disipador.....	
Figura 4.13: Aspecto físico del horno Binder a 90°C.....	
Figura 4.14: LEDs con disipador y conexiones dentro de la caja de aluminio abierta.....	
Figura 4.15: Descripción visual del ensayo a 90°C con la caja de aluminio cerrada.....	
Figura 4.16: Horno con LEDs y conexiones en el interior.....	
Figura 4.17: Horno con células en el interior.....	
Figura 4.18: Funcionamiento de las células dentro de la caja.....	
Figura 4.19: Aspecto del horno funcionando a 60°C de marca Selecta.....	
Figura 4.20: Horno funcionando a 60°C.....	
Figura 4.21: Instrumentación utilizada en el puesto 1.....	
Figura 4.22: Sistema de conexión utilizado en el proyecto fin de carrera de los Jorges.....	
Figura 4.23: Diagrama de bloques utilizado en el proyecto fin de carrera de los Jorges.....	
Figura 4.24: Aspecto físico de la tarjeta Keithley 7700.....	
Figura 4.25: Esquema interno de la tarjeta Keithley 7700.....	
Figura 4.26: Conexión de la tarjeta Keithley 7700.....	
Figura 4.27: Aspecto físico de la fuente de alimentación FAC 66-2B.....	
Figura 4.28: Aspecto físico de la tarjeta.....	

Figura 4.29: Aspecto físico del USB 6501.....	
Figura 4.30: Aspecto físico del cable GPIB.....	
Figura 4.31: Adaptador IEEE-488 GPIB.....	
Figura 4.32: Aspecto físico TTI EX354D.....	
Figura 4.33: Puesto de trabajo dos para la medición de espectro y curvas I-V.....	
Figura 4.34: Diagrama de conexión de medición de curvas I-V.....	
Figura 4.35: Aspecto físico de la fuente.....	
Figura 4.36: Aspecto físico del espectrómetro MIGHTEX SSE 1304 U.....	
Figura 4.37: Conexión USB con el espectrómetro por cable de fibra óptica.....	
Figura 4.38: Esfera integradora y cable de fibra óptica.....	
Figura 4.39: Aspecto físico del multímetro.....	
Figura 4.40: Aspecto físico de la cámara y el adaptador de microscopio.....	
Figura 4.41: Cámara adaptada en el microscopio.....	
Figura 4.42: PC utilizado en el puesto 1.....	
Figura 4.43: PC utilizado en el puesto 2.....	
Figura 4.44: Pestaña control de programa Gesusuario.....	
Figura 4.45: Pestaña Relay del programa Gesusuario.....	
Figura 4.46: Pestaña Time del programa Gesusuario.....	
Figura 4.47: Pestaña State del programa Gesusuario.....	
Figura 4.48: Pestaña Channels del programa Gesusuario.....	
Figura 4.49: Pestaña I-V curves del programa Gesusuario.....	
Figura 4.50: Programa de medición de las curvas I-V.....	
Figura 4.51: Configuración de los parámetros.....	
Figura 4.52: Aspecto de una captura en movimiento de un LED UV.....	
Figura 4.53: Posición de longitud de onda según los estándares cromáticos.....	
Figura 4.54: Modo de captura de imagen estática.....	
Figura 4.55: Imagen del chip interior del diodo tipo II.....	

CAPITULO 5.....82-106

Figura 5.1: Evolución de la curva I-V del diodo 2.....	
Figura 5.2: Evolución de la curva I-V del diodo 4.....	
Figura 5.3: Evolución de la curva I-V del diodo 8.....	
Figura 5.4: Evolución de la curva I-V del diodo 10.....	
Figura 5.5: Evolución de la curva I-V del diodo 6.....	
Figura 5.6: Evolución de la curva I-V del diodo 7.....	
Figura 5.7: Evolución de la curva I-V del diodo 1.....	
Figura 5.8: Evolución de la curva I-V del diodo 4.....	
Figura 5.9: Evolución de la curva I-V del diodo 8.....	
Figura 5.10: Evolución de la curva I-V del diodo 12.....	
Figura 5.11: Evolución de la curva I-V del diodo 5.....	
Figura 5.12: Evolución de la curva I-V del diodo 7.....	
Figura 5.13: Evolución espectral, LED3.....	
Figura 5.14: Evolución espectral, LED4.....	
Figura 5.15: Evolución espectral, LED2.....	
Figura 5.16: Evolución espectral, LED4.....	
Figura 5.17: Evolución espectral, LED8.....	
Figura 5.18: Evolución espectral, LED10.....	
Figura 5.19: Evolución espectral, LED8.....	
Figura 5.20: Evolución espectral, LED11.....	
Figura 5.21: Evolución espectral, LED11.....	
Figura 5.22: Evolución espectral, LED7.....	
Figura 5.23: Evolución espectral, LED5.....	
Figura 5.24: Evolución espectral, LED7.....	
Figura 5.25: Evolución del número de cuentas a 60°C.....	
Figura 5.26: Evolución del número de cuentas a 75°C.....	
Figura 5.27: Evolución del número de cuentas a 90°C.....	
Figura 5.28: Media de potencia relativa.....	
Figura 5.29: Evolución del número de cuentas a 60°C.....	
Figura 5.30: Evolución del número de cuentas a 75°C.....	
Figura 5.31: Evolución del número de cuentas a 90°C.....	

Figura 5.32: Media de potencia relativa.....	
Figura 5.33: Estado inicial del LED Tipo I (16x).....	
Figura 5.34: Estado inicial del LED Tipo II (10x).....	
Figura 5.35: LED 3 Tipo I tras 1080 horas.....	
Figura 5.36: LED 3 Tipo I tras 1500 horas.....	
Figura 5.37: LED 4 sin degradación tras final de ensayo tras 1500 horas.....	
Figura 5.38: LED 2 Tipo II tras 1080 horas de ensayo.....	
Figura 5.39: LED 2 Tipo II tras 1500 horas de ensayo.....	
Figura 5.40: Wire bonding del LED 2 tipo II tras 1500 horas de ensayo.....	
Figura 5.41: LED 4 Tipo II tras 1500 horas de ensayo.....	
Figura 5.42: LED 2 Tipo I tras 780 horas de ensayo.....	
Figura 5.43: LED 2 Tipo I tras 1080 horas de ensayo.....	
Figura 5.44: LED 10 Tipo I tras 1080 horas de ensayo.....	
Figura 5.45: LED 8 Tipo II tras 780 horas de ensayo.....	
Figura 5.46: LED 8 Tipo II tras 1080 horas de ensayo.....	
Figura 5.47: LED 12 Tipo II tras 1080 horas de ensayo.....	
Figura 5.48: LED 12 Tipo II tras 449 horas de ensayo.....	
Figura 5.49: LED 11 Tipo I tras 1380 horas de ensayo.....	
Figura 5.50: LED 7 Tipo I tras 449 horas de ensayo.....	
Figura 5.51: LED 7 Tipo I tras 1380 horas de ensayo.....	
Figura 5.52: LED 6 Tipo II tras 765 horas de ensayo.....	
Figura 5.53: LED 6 Tipo II tras 1380 horas de ensayo.....	
Figura 5.54: LED 7 Tipo II tras 1052 horas de ensayo.....	
Figura 5.55: LED 7 Tipo II tras 1380 horas de ensayo.....	
Figura 5.56: Detalle silicona en malla metálica tras 1500 horas.....	
Figura 5.57: Formación de delaminación.....	

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 4.....48-81

Tabla 4.1: Parámetros máximos del diodo Tipo I.....	
Tabla 4.2: Parámetros máximos del diodo Tipo II.....	
Tabla 4.3: Clasificación de LEDs a 90°C.....	
Tabla 4.4: Clasificación de LEDs a 75°C.....	
Tabla 4.5: Clasificación de LEDs a 60°C.....	

CAPITULO 5.....82-106

Tabla 5.1.....	
Tabla 5.2.....	
Tabla 5.3.....	
Tabla 5.4.....	
Tabla 5.5.....	
Tabla 5.6.....	
Tabla 5.7.....	
Tabla 5.8.....	
Tabla 5.9.....	
Tabla 5.10.....	
Tabla 5.11.....	
Tabla 5.12.....	
Tabla 5.13 Evolución de las características espectrales de los diodos.....	
Tabla 5.14 Cálculos de tiempo de cracking y potencia luminosa al final relativa a la potencia inicial.....	

CAPITULO 7.....107-112

Tabla 7.1 Ordenador y software.....	
Tabla 7.2 Equipamiento.....	
Tabla 7.3 Fungible.....	
Tabla 7.4 Mano de obra.....	
Tabla 7.5 Coste total.....	

INTRODUCCION

Durante los últimos años la utilización de los LEDs (Light Emitting Diodes) ha aumentado de forma muy importante siendo hoy en día una alternativa real a los sistemas de iluminación tradicionales.

La iluminación basada en LEDs se está utilizando ampliamente en automoción, arquitectura, aplicaciones domésticas y señalización debido a su alta fiabilidad, pequeño tamaño y bajo consumo.

La evaluación de la fiabilidad de los LEDs es un tema clave previo a la comercialización o a la puesta en marcha del LED en una nueva aplicación. La evaluación de la fiabilidad de dispositivos requiere ensayos acelerados para obtener resultados de fiabilidad en un periodo de tiempo aceptable, del orden de pocas semanas.

En éste proyecto se estudia la fiabilidad de dos tipos diferentes de LEDs ultravioleta, que pueden sustituir a las lámparas UV convencionales, para diferentes condiciones de trabajo y diferentes condiciones ambientales. Se hace un seguimiento de la evolución de los LEDs UV durante cientos horas de ensayo acelerado para obtener resultados y conclusiones acerca de la degradación que sufren.

La memoria del proyecto fin de carrera se ha estructurado en siete capítulos. Tres de ellos son teóricos, otros tres prácticos y finalmente uno sobre el presupuesto.

El primero explica la introducción y la evolución del diodo LED, el segundo introduce la fiabilidad explicando los modelos más utilizados para analizar los ensayos y el tercero es un breve tema acerca de los ensayos acelerados.

Los otros tres capítulos son orientados a los experimentos realizados en este Proyecto Fin de Carrera. Uno trata sobre la descripción del ensayo acelerado realizado, otro analiza los resultados obtenidos, el siguiente analiza las conclusiones y el último el presupuesto.

Por lo tanto los capítulos en que se han dividido la memoria son:

- El diodo LED. Capítulo 1
- La fiabilidad. Capítulo 2
- Ensayos de fiabilidad. Capítulo 3
- Descripción del ensayo. Capítulo 4
- Resultados. Capítulo 5
- Conclusiones. Capítulo 6
- Presupuesto. Capítulo 7

Finalmente aparecerán las referencias bibliográficas usadas a lo largo del proyecto.

INTRODUCTION

For the last years, the use of LEDs (Light Emitting Diodes) has increased significantly, being nowadays a real alternative to traditional lighting systems.

Lighting based on LEDs is being extensively used in automotive, domestic applications and signaling due to its high reliability small size and low power consumption.

The evaluation of LEDs reliability is a key issue before marketing or launching a new application. The reliability evaluation of devices requires accelerated tests to obtain reliability results in an acceptable period of time, for the order of few weeks.

In this project the reliability of two different types of UV LEDs, which can replace conventional UV lamps for different conditions and different environmental conditions is studied. The evolution of LEDs UV is tracked during hundred hours of accelerated test to obtain the results and conclusions about the degradation suffered.

The memory of the final project has been structured into seven chapters. Three of them are theoretical another three are experimental and the last one about estimates.

The first explains the introduction and development of LED, the second introduces the reliability explaining the most used models to analyze the tests and the third is a brief topic about the accelerated tests.

The other three chapters are oriented to the experiments done in this PFC. One explains the description of the accelerated test we have done, another analyzes the results obtained, the following one exposes the conclusions and the last one the estimates.

- The LED diode. Capítulo 1
- Reliability. Capítulo 2
- Accelerated tests. Capítulo 3
- Accelerated test description. Capítulo 4
- Results. Capítulo 5
- Conclusions. Capítulo 6
- Estimate. Capítulo 7

Finally will appear bibliography references used among the project.

CAPITULO 1

EL DIODO LED

1 EL DIODO LED

El artífice del primer diodo LED formado por óxido de cinc y carburo de silicio fue el científico ruso Oleg Vladimirovich Losev en 1927. Su descubrimiento supuso abrir el camino a los posteriores descubrimientos.

En 1962 Nick Holonyak inventó el primer LED rojo que emitía en el espectro visible aunque debido a su escasa luminosidad, únicamente sirvió como indicador. Quince años más tarde descubriría el láser de punto cuántico que abriría las puertas a las comunicaciones por fibra óptica y reproductores de CD.

En la década de los 90 se desarrollaron los LEDs ultravioleta y azul, lo que permitió crear el LED de luz blanca, mejorando la iluminación de los diodos a través de conversión luminiscente en 1995.

Actualmente es una tecnología que está en continuo desarrollo para mejorar sus prestaciones y descubrir nuevas aplicaciones.

1.1 Funcionamiento

Sus siglas provienen de “*Light-Emitting Diode*” y básicamente es un material semiconductor cuyo propósito es emitir luz al ser excitado con corriente. Según el material del que esté hecho emitirá un color diferente.

Cuando el diodo LED se encuentra en polarización directa, los electrones cruzan la unión desde el material tipo n al tipo p. Los huecos del material tipo p y los electrones del material tipo n, son ambos impulsados hacia la región activa, liberando energía en forma de fotones, fenómeno que se denomina *electroluminiscencia*.

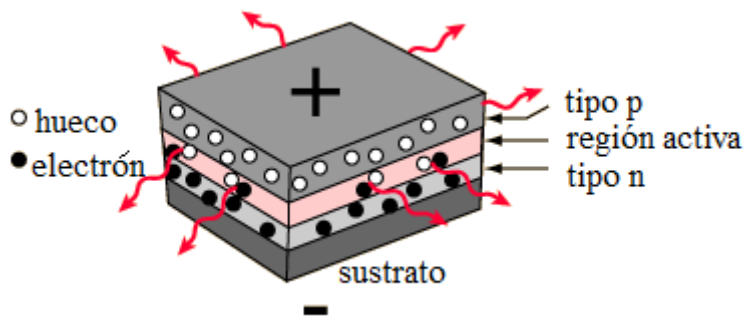


Figura 1.1 Regiones del diodo LED

La estructura de bandas de un semiconductor es parecida a la de un aislante, con la diferencia de que la banda prohibida es bastante pequeña.

Un semiconductor se comporta como un aislante en condiciones normales pero cuando hay un incremento de temperatura proporciona la suficiente energía a los electrones para que saltando a la banda prohibida, pasen a la de conducción dejando el hueco correspondiente en la banda de valencia.

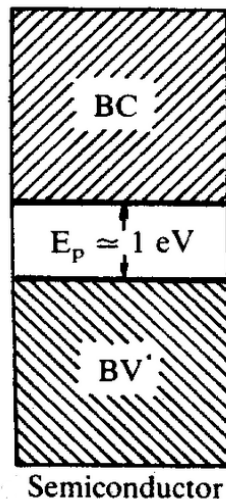


Figura 1.2 Bandas de conductor y de valencia

Donde 1 eV es una unidad de energía que equivale a $1,602176462 \times 10^{-19} \text{ J}$ (Julios) y que consiste en la multiplicación de la carga del electrón por la unidad de potencial eléctrico V (Voltios).

1.2 Simbología

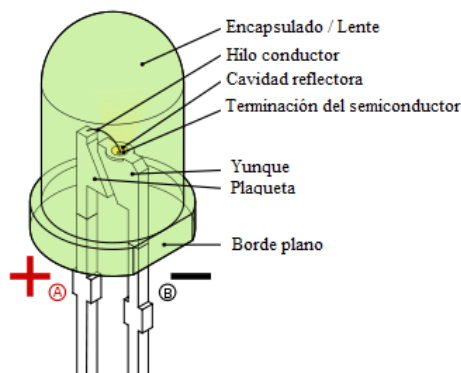


Figura 1.3. Encapsulado de un diodo convencional

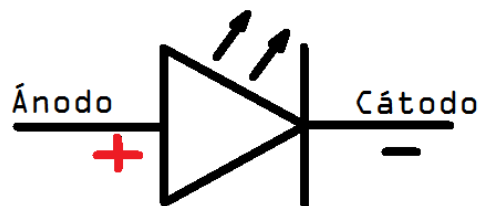


Figura 1.4. Símbolo del diodo LED en el diseño electrónico

Como dato de utilidad a la hora de iniciar alguna actividad con estos dispositivos es importante identificar ánodo y cátodo para poder polarizar el diodo en directa. La pata mas larga siempre va a ser el ánodo mientras que el cátodo lo podemos identificar viendo el encapsulado con forma plana (*véanse las figuras anteriores*).

1.3 Composición

El color del diodo LED depende directamente del material semiconductor elegido ya que la energía de la banda prohibida coincide con la energía del fotón emitido. En la siguiente tabla se observan distintas composiciones de LEDs, cuyos elementos pertenecientes a la tabla periódica proporcionan una longitud de onda y un espectro distinto para cada uno habitualmente.

1.3.1 Tabla característica de diodos LED

La siguiente tabla nos permite clasificar material del LED con la longitud de onda. En algunos casos los materiales semiconductores son ternarios o cuaternarios y dependiendo de la composición se puede diseñar la longitud de onda de la luz emitida:

Composición del chip	Nombre del compuesto	Color de la luz emitida	Tensión de trabajo en volt (V)	Frecuencia en hertz (Hz)	Longitud de onda en nm
GaAs	Arseniuro de galio	Infrarrojo	< 1,9	< $4,0 \times 10^{14}$	> 760
GaAlAs	Arseniuro de galio y aluminio				
GaP	Fosfuro de galio				
GaAlAs	Arseniuro de galio y aluminio				
AlInGaP	Fosfuro de aluminio indio y galio				
GaAsP/GaP	Fosfuro de galio y arsénico / Fosfuro de galio		$\pm 1,8$	$4,8 - 4,0 \times 10^{14}$	610 - 760
AlInGaP	Fosfuro de aluminio indio y galio				
GaAsP/GaP	Fosfuro de galio y arsénico / Fosfuro de galio				
AlInGaP	Fosfuro de aluminio indio y galio				
GaP	Fosfuro de galio				
InGaP	Nitruro de indio y galio		$\pm 2,0$	$5,1 - 4,8 \times 10^{14}$	590 - 610
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
SiC	Carburo de silicio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio		$\pm 3,0$	$5,3 - 5,1 \times 10^{14}$	570 - 590
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro		$\pm 3,3$	$5,8 - 5,3 \times 10^{14}$	500 - 570
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
InGaP	Nitruro de indio y galio		$\pm 3,4$	$6,7 - 6,0 \times 10^{14}$	450 - 500
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
InGaP	Nitruro de indio y galio		$\pm 3,7$	$7,9 - 6,7 \times 10^{14}$	< 400
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
GaN	Nitruro de galio				
InGaP / Zafiro	Nitruro de indio y galio / Zafiro				
Ce:YAG	Granate-aluminio-itrío, dopado de cerio	Ultravioleta	$\pm 3,4$	Espectro completo	Espectro completo

Figura 1.5. Tabla característica para clasificar el material del LED con long. de onda

1.4 Diodos de alta luminosidad

Actualmente se pueden conseguir diodos de alta luminosidad como pueden ser rojos, verdes ó ámbar entre otros los diodos blancos partieron como una evolución del diodo azul hacia la luz blanca, cuya diferencia es un recubrimiento de fósforo que produce una luz amarillenta.

Los LEDs de alta luminosidad tienen una alta fiabilidad cuando las condiciones de funcionamiento son las nominales dadas por el fabricante especificado en el *datasheet* del diodo.

No obstante, las condiciones climatológicas como la temperatura y humedad hacen que la potencia lumínica, o la longitud de onda de la luz emitida, puedan ir degradándose, perdiendo de esta forma parte de la funcionalidad en la aplicación en la que se estén utilizando al cabo de miles de horas.

Existen muchos LEDs que funcionan en exteriores como en coches, letreros de publicidad, semáforos... hasta el alumbrado de la calle sustituyendo las farolas convencionales. Es muy interesante evaluar la influencia de la temperatura y humedad en la fiabilidad ya que estos dispositivos pueden trabajar en ambientes climatológicos extremos.



Figura 1.6. Semáforo LED



Figura 1.7. Alumbrado LED

1.5 Diodo ultravioleta

Los revolucionarios LEDs ultravioleta son más manejables, eficientes, de menor tamaño y más ecológicos con el medio ambiente que las lámparas convencionales ultravioleta al resultar estas más contaminantes para el medio ambiente dada su composición provistas de Mercurio, Galio, Hierro, Plomo, Talio o Bismuto.

Otro inconveniente de los sistemas de iluminación UV tradicionales es que precisan calentarse previamente a su funcionamiento. Sin embargo, los LEDs UV pueden ser conectados inmediatamente lo que implica que no haya pérdidas de energía. De este modo aumenta el rendimiento energético y con el consiguiente ahorro energético.

Otras ventajas de los LEDs UV con respecto a las fuentes tradicionales UV son su bajo consumo, su fiabilidad y su menor tamaño lo que ha abierto la posibilidad de utilización en nuevas aplicaciones.

Estos dispositivos nos permiten desarrollar aplicaciones para la ciencia como pueden ser: el tratamiento de agua, aire o superficies o aplicaciones en el campo de la medicina como la cirugía guiada por fluorescencia o la fototerapia entre otras

Dependiendo del fabricante los podemos encontrar los LEDs en forma de matriz, o con el encapsulado convencional con diferentes longitudes de onda para que se adapten a nuestro tipo de aplicación.

A continuación vamos a mostrar los diferentes rangos de radiación ultravioleta.

1.6 Radiación ultravioleta

El espectro de luz visible perceptible por el ojo humano comprende una franja de longitud de onda comprendida entre los 400 nm y los 700 nm aproximadamente cuya magnitud es la longitud de onda y se mide en nanómetros (nm).

En la parte superior de energía del espectro se sitúa la radiación ultravioleta que se encuentra principalmente en la radiación solar, de menor longitud de onda que el espectro de luz visible y mayor que la de rayos-x.

La siguiente imagen representa el espectro ultravioleta:

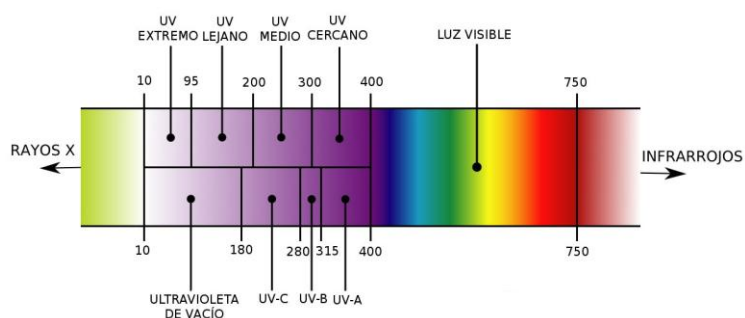


Figura 1.8. Espectro ultravioleta en nanómetros (nm) y luz visible

A medida que la longitud de onda sea menor, y por lo tanto energías mayores, nos acercaremos a radiaciones ionizantes que son peligrosas para el ser humano.

1.7 Fenómeno de la fluorescencia

La fotoluminiscencia se define como el proceso de emisión de la radiación debido a la desactivación de una molécula dada y se produce cuando una sustancia es excitada por radiación electromagnética que pasa a un estado electrónico excitado.

La absorción de energía se puede disipar de dos maneras diferentes:

1. En forma de calor a través de las colisiones entre los átomos o moléculas.
2. El resto se emite en forma de radiación electromagnética con una longitud de onda distinta a la de la fuente.

También puede producirse la quimioluminiscencia donde la energía de excitación proviene de una reacción química o si ocurre en los seres vivos se denomina bioluminiscencia.

Para producir el efecto de fluorescencia, es necesario que la sustancia a detectar emita a una longitud de onda mayor que la fuente de luz utilizada. Tanto con el uso de las lámparas UV como en los LEDs UV se puede observar este fenómeno.

Cuando la radiación es absorbida por el material los electrones permanecen temporalmente en un mayor estado de energía, después esta energía es liberada volviendo los electrones a su estado normal. Esta energía radiante es la que podemos ver como luz visible con el nombre de fluorescencia y dependiendo del material que sea radiado podremos ver este efecto en mayor o menor medida cambiando de color.

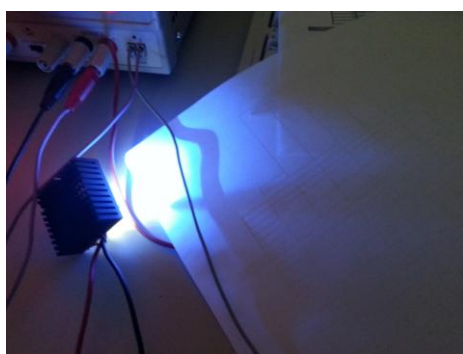


Figura 1.9. Ejemplo de fluorescencia observada sobre un papel

Gracias a este fenómeno surgen muchas aplicaciones y estudios que resumiremos a continuación.

1.8 Aplicaciones LED UV

En el tratamiento de agua existen aplicaciones para la eliminación de microorganismos sin utilizar componentes químicos como el cloro o el ozono mediante la radiación UV de alta energía o también la detección de hidrocarburos en el agua mediante técnicas fluorescentes.

También es aplicable la fluorescencia en el análisis no destructivo sobre pigmentos y minerales, la conservación de objetos como por ejemplo la cerámica que puede revelar una decoloración muy desgastada bajo la influencia de un área fluorescente, o la revelación de inscripciones en documentos como pergaminos que fueron borradas con el paso del tiempo, mediante la fluorescencia son detectados. La restauración de obras de arte, la detección de billetes ilegales o rastros de sangre son algunas de las técnicas que utilizan esta metodología.

Según el tipo de aplicación que realizamos hay que escoger fuentes de radiación ultravioleta diferentes como lámparas ultravioleta o diodos:



Figura 1.10. Lámpara para la autenticidad de billetes o cualquier otro documento verificable por luz UV



Figura 1.11. Diodo LED UV

Analizando la figura 1.8 de la radiación UV podemos dividir el espectro para diferentes aplicaciones:

Aplicaciones médicas:

- UV-A: Banda de los 315 a los 400 nm. Es la más cercana al espectro visible. Esta longitud de onda es aplicable en trampas para insectos, fototerapia, efectos escénicos o la más conocida, tomar el sol mediante los tubos fluorescentes.
- UV-B: Banda de los 280 a los 315 nm. La fototerapia para tratar enfermedades de la piel.
- UV-C: Banda de los 280 a los 180 nm. Esta longitud de onda se utiliza en aplicaciones para la eliminación de microorganismos en el agua.
- Ultravioleta de vacío: Banda de los 280 a los 10 nm.

Longitudes de onda más frecuentes en astronomía para la detección de estrellas o planetas:

- Ultravioleta cercano: Banda de los 400 a los 300 nm
- Ultravioleta medio: Banda de los 300 a los 200 nm
- Ultravioleta lejano: Banda de los 200 a los 95 nm
- Ultravioleta extremo: Banda de los 95 a los 10 nm

1.9 CONCLUSIONES CAPITULO 1

En este capítulo se han descrito los aspectos más importantes que conciernen a los diodos LEDs:

- Se ha realizado una introducción al diodo LED donde se ha descrito brevemente el origen de los primeros dispositivos LEDs hasta la obtención de los primeros diodos ultravioleta y de luz blanca. Se hace una descripción física del diodo LED señalando sus partes más importantes y también se hace una clasificación según el tipo de material semiconductor elegido.
- Posteriormente se describe la aparición de diodos LED de alta luminosidad que darán lugar a una gran cantidad de aplicaciones y ventajas con respecto a las fuentes de luz convencionales, hasta llegar al desarrollo del LED ultravioleta, cuya radiación introduce el concepto de la fluorescencia.
- Con todo lo expuesto en este capítulo podemos decir que la importancia de la investigación en diodos LED da como resultado la aparición de nuevos usos y aplicaciones, ahorro en consumo o costes de producción, apuntando a ser una tecnología que predominará en nuestra vida cotidiana.

CAPITULO 2

LA FIABILIDAD

2 Introducción a la fiabilidad

La fiabilidad de un producto es la probabilidad de que permanezca en buenas condiciones y que su funcionamiento sea correcto en un tiempo dado.

No se puede asegurar que un producto no vaya a fallar, de hecho todos los productos fallan por lo que el objetivo es que la probabilidad de fallo sea la menor posible.

Es por ello que la legislación europea incluye periodos de garantía para cubrir posibles defectos en los dos primeros años.

Calidad y fiabilidad están relacionadas pero son completamente diferentes. La calidad garantiza que un producto sale de fábrica en buenas condiciones, lo que únicamente nos indica que funciona en $t=0$, por lo que carece de la dependencia temporal de la fiabilidad.

Para crear un modelo matemático para la probabilidad de fallo, consideramos el funcionamiento de un determinado elemento en el medio para él especificado. Definimos la variable aleatoria como el tiempo durante el que el elemento funciona satisfactoriamente antes de que se produzca un fallo.

A la fiabilidad la designamos $R(t)$ y el tiempo de fallo es T .

$$R(t) = \Pr(T > t) \quad (1)$$

La fiabilidad es la probabilidad de que el elemento falle después de t o dicho de otra forma que el elemento funcione en t .

Dado un lote de N elementos podemos evaluar la fiabilidad como la relación entre los elementos que sobreviven sobre el total.

$N_s(t)$ = N° de elementos en funcionamiento en el instante t

N = N° de elementos en funcionamiento al principio

$N_f(t)$ = N° de elementos averiados hasta el momento t

Se cumple que: $N = N_f(t) + N_s(t)$

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N(0)} = 1 - \frac{N_f(t)}{N(0)} \quad (2)$$

Si definimos $F(t)$ como la función complementaria a $R(t)$, es decir, probabilidad de un fallo antes que ocurra un instante t :

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N} \quad (3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4)$$

El estudio de fallos en el dominio del tiempo es el campo de la fiabilidad y podemos distinguir entre fallos catastróficos y fallos por degradación.

2.1 Fallo catastrófico

Se definen como una pérdida total de la funcionalidad del dispositivo de forma repentina y súbita.

2.2 Fallo por degradación

Hay dispositivos que antes de fallar de forma catastrófica pierden sus prestaciones de forma gradual. Este es el caso en muchas ocasiones de los módulos fotovoltaicos o los LEDs. Estas pérdidas de prestaciones pueden dar lugar a que el dispositivo no cumpla con su funcionalidad, y por lo tanto falle. En el caso de los LEDs para aplicaciones de iluminación se considera fallo cuando la potencia lumínica cae por debajo del 70% de su valor nominal.

Entonces el problema fundamental en fiabilidad, es estimar la vida de un producto o sistema y la probabilidad de que se produzca un fallo en cada momento y se analiza con análisis de datos de supervivencia.

2.3 Análisis de datos de supervivencia

Consiste en el seguimiento o estudio de un proceso desde su inicio hasta su fin que engloba una serie de variables aleatorias positivas. En ingeniería se estudia la fiabilidad de componentes donde una de estas variables aleatorias es el tiempo transcurrido desde que un componente empieza a funcionar hasta que deja de hacerlo.

2.3.1 Funciones asociadas

La fiabilidad se puede describir con funciones estadísticas para un análisis más detallado. A continuación mostraremos las funciones más importantes.

2.3.1.1 Función de fiabilidad o supervivencia

La probabilidad de que un componente funcione más allá de un instante t .

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(x) = 1 - F(t)$$

Siendo: $R(0) = 1$

$$R(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$$

Obtendremos una gráfica decreciente desde valor la unidad en $t=0$, hasta tender a 0 en el infinito.

2.3.2 Tasa de fallos

Permite determinar la probabilidad de fallo instantánea dado que el componente funciona en el momento actual.

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Informa de lo probable que falle un dispositivo con respecto a los supervivientes y se aplica a seguros de vida o mantenimiento de equipos.

2.3.2.1 Tipos de función de la tasa de fallos

En la práctica podemos encontrar tres tendencias diferentes en la tasa de fallos:

- IFR (*Increasing Failure Rate* o *tasa de fallos creciente*) surge por un proceso de envejecimiento donde la tasa de fallos se incrementa a medida que pasa el tiempo.
- DFR (*Decreasing Failure Rate* o *tasa de fallos decreciente*) surge cuando la tasa de fallos a medida que aumenta el tiempo es menor. Es propio de componentes que fallan mucho en sus primeras horas de vida.
- CFR (*Constant Failure Rate* o *tasa de fallos constante*) donde la tasa de fallos es prácticamente constante.

Estas tres formas básicas de modelo de tasa de fallos sirven para generar la curva de la bañera.

2.4 Modelo de la Curva de la bañera o “bathtub curve”

El siguiente modelo representa la probabilidad de fallo instantáneo de un elemento que primero se comporta de forma decreciente (DFR) cuyo periodo de tiempo se le denomina zona de mortalidad infantil. Segundo, mantiene una probabilidad de fallo constante a lo largo del periodo de su vida útil (CFR) y por último, su tasa de fallos incrementa con el tiempo (IFR) cuya zona se denomina zona de desgaste o envejecimiento.

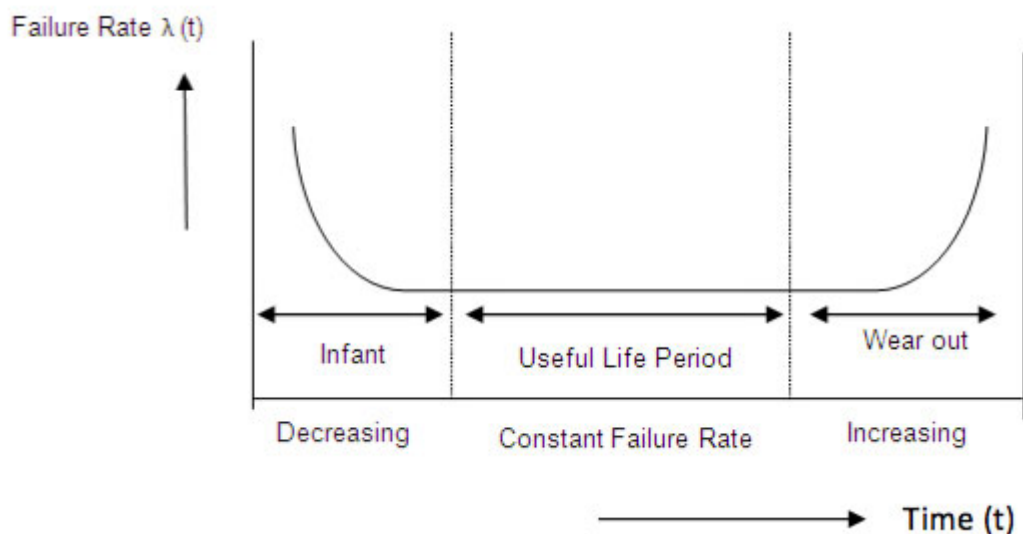


Figura 2.1. Representación gráfica de la curva de la bañera

A modo de ejemplo, con esta imagen para que se entienda podemos describir la vida humana, donde el individuo cuando nace tiene una probabilidad alta de que muera, disminuye en edades medias alcanzando unas edades donde la tasa de fallos es prácticamente constante y por último aumenta al alcanzarse edades elevadas.

Volviendo a nuestro ejemplo con componentes, cuando la tasa de fallos responde al modelo de la curva de la bañera, es conveniente realizar un ensayo acelerado del mismo para que supere la zona de mortalidad infantil. A este ensayo se le denomina ensayo de cribado. Con esto las empresas son capaces de superar defectos ocultos en las primeras horas de ensayo que abarca la zona de mortalidad infantil, garantizando un funcionamiento correcto al averiguar una proximidad a la zona de vida útil y aumentando la probabilidad de que el componente no falle en un determinado número de horas.

2.5 Tiempo medio hasta el fallo (Mean Time to Failure-MTTF)

La medida de centralidad más utilizada de una distribución es la media, μ , o esperanza matemática.

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx$$

En fiabilidad a la esperanza matemática se denomina MTTF (Mean Time To Failure o Tiempo Medio hasta el Fallo) y los tiempos de fallo solo pueden tomar valores positivos por lo que:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

Nos indica el tiempo donde se encuentra la media de los fallos.

Alternativamente, en sistemas que son reparados los elementos que fallan y continúan funcionando la expectativa se llama tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures-MTBF).

2.6 Modelos de distribución utilizados en Fiabilidad

A continuación vamos a describir brevemente las distribuciones estadísticas más utilizadas en fiabilidad:

2.6.1 Modelo de distribución Normal

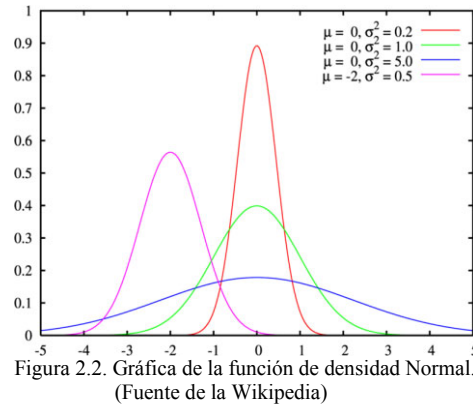
La distribución normal, también conocida como la distribución de Gauss, es la distribución de propósito general más ampliamente utilizada.

La distribución normal es una distribución de variable continua que queda especificada por dos parámetros de los que depende su función de densidad y que resultan ser la media y la desviación típica de la distribución.

- La función de densidad es:

$$f(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

Podemos ver un ejemplo gráfico en la siguiente imagen donde para cualquier valor de α se verifica que: $f(\mu + \alpha) = f(\mu - \alpha)$. Esto quiere decir que la función es simétrica respecto a la media, μ .



Como podemos ver en la imagen la función distribución normal admite valores negativos. Contrasta con el hecho de que los tiempos transcurridos hasta el fallo sean siempre valores positivos, es por ello que en muchos casos se utiliza la distribución lognormal.

2.6.2 Modelo de distribución Lognormal

Cuando los logaritmos de una variable se describen mediante una distribución normal obtenemos la distribución lognormal, aplicable cuando las desviaciones del valor del modelo están formadas por factores, proporciones o porcentajes más que por valores absolutos como es el caso de la distribución normal.

Se define con dos parámetros, μ y σ , que son la media y la desviación estándar del logaritmo de la variable. En el caso de que el valor de σ sea grande comparado con μ , el pico máximo de la función densidad está muy cercano al origen y la tasa de fallos ($\lambda(t)$ o $h(t)$) se ajusta al periodo infantil de la curva de bañera.

Algún ejemplo de aplicación es en el análisis de la fiabilidad de semiconductores y en el análisis de la vida por fatiga de ciertos componentes mecánicos.

En la siguiente imagen podemos ver como los valores μ y σ influyen en la función de densidad:

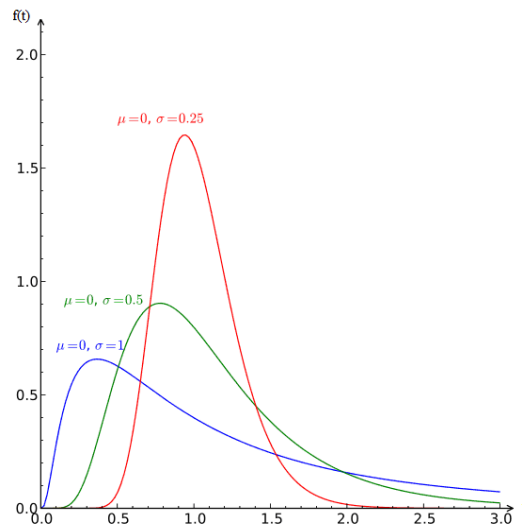


Figura 2.3. Gráfica de la función de densidad Lognormal.
(Fuente de la Wikipedia)

La función de distribución acumulada queda de la siguiente manera:

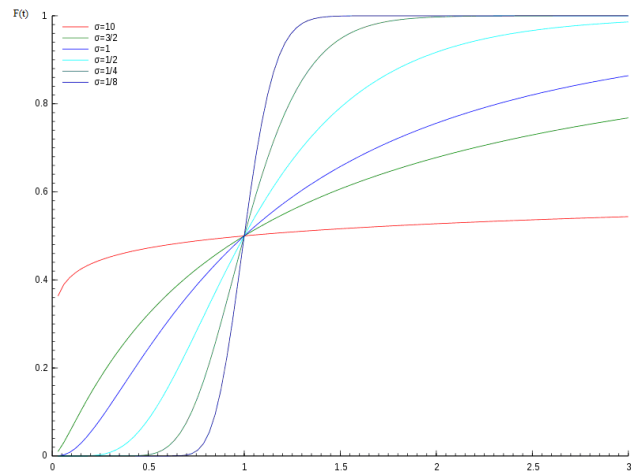


Figura 2.4. Gráfica de la función de distribución Normal.
(Fuente de la Wikipedia)

2.6.3 Modelo de distribución exponencial

Tiene una importante utilidad práctica como la distribución del tiempo que transcurre hasta que se produce un fallo y describe el periodo de vida útil donde la tasa de fallos es constante y se aplica a la fiabilidad de la mayoría de dispositivos semiconductores con bajo estrés, una vez eliminados los fallos infantiles por defectos de fabricación.

Esta distribución es la empleada para predecir la fiabilidad de equipos electrónicos a partir de la norma MIL-HDBK-217F “Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment” [MHDBK91].

Las principales cualidades de la distribución exponencial son:

- Simplicidad de los métodos estadísticos.
- Tasa de fallos constante.

- Falta de memoria. La probabilidad de fallar condicionada a que el elemento esté en uso no varía con el tiempo.

Modelo matemático:

- La función de densidad de una variable aleatoria con distribución exponencial es:

$$(1) \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{para } t \geq 0, \text{ siendo } \lambda \geq 0$$

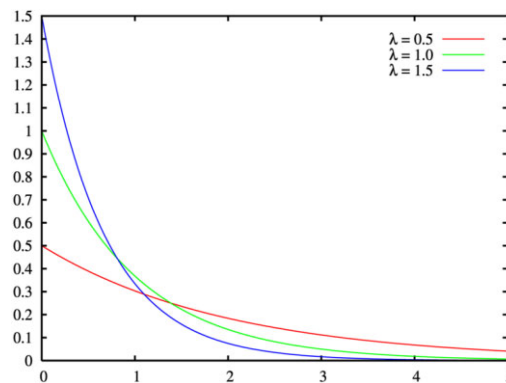


Figura 2.5. Función de densidad para valores de λ

(Fuente de la Wikipedia)

- La función de distribución acumulada:

$$(2) \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

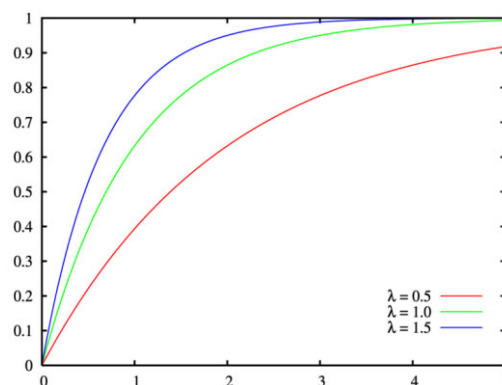


Figura 2.6. Gráfica de la función de distribución para valores de λ

(Fuente de la Wikipedia)

- Y su función de fiabilidad:

$$(3) \quad R(t) = e^{-\lambda t}$$

- Función de tasa de fallos

$$(4) \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda$$

- La media será:

$$(5) \quad E[X] = \frac{1}{\lambda} \quad \text{donde } X \text{ representa una variable aleatoria discreta}$$

- La varianza:

$$(6) \quad V(X) = \frac{1}{\lambda^2}$$

A continuación veremos que la distribución de Weibull, complementa a la distribución exponencial y la normal, siendo la primera un caso particular de la distribución de Weibull.

2.6.4 Modelo de distribución de Weibull

La distribución de Weibull es una distribución muy versátil ya que emula la ley de vida en las diferentes etapas de la curva de bañera. Se caracteriza por considerar la tasa de fallos variable, siendo utilizada por su gran flexibilidad, al poder ajustarse a una gran variedad de funciones de fiabilidad de dispositivos o sistemas.

Existen dos tipos de soluciones analíticas de gran complejidad llamadas: método de los momentos y método de máxima verosimilitud. En su lugar utilizaremos un modelo gráfico de Weibull con una gráfica basada en determinar un parámetro de origen (γ).

Este método nos facilitará la identificación de aquellas variables que influyen en la tasa de fallos y la predicción de comportamientos.

2.6.4.1 Modelo matemático

La distribución de Weibull se identifica mediante tres parámetros:

- γ es el parámetro de posición (unidad de tiempos) 0 vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.
- β es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos.
- η es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo, del eje de los tiempos.
- La función de densidad del modelo de Weibull es:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

- La función de distribución es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

- Y la función de fiabilidad:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Hay tres posibles casos que nos podemos encontrar:

El análisis de la función $F(t)$ depende de estos tres parámetros, pero es habitual trabajar considerando $\gamma=0$, el parámetro de origen es 0, lo que simplifica el análisis a dos parámetros. La simplificación realizada permite un análisis adecuado en la inmensa mayoría de los casos, ya que el valor de γ es habitualmente 0 (esto implica que la función de probabilidad de fallo comienza en $t=0$) o su valor es muy pequeño comparada con la otra variable temporal η .

Sustituyendo $\gamma = 0$ en las ecuaciones (1),(2) y (3) y obtenemos las siguientes:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

La media, también llamada MTTF (Mean Time To Failure) para elementos no reparables, de la función de distribución de Weibull viene dada por:

$$\mu = E(\gamma) = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (7)$$

Donde: $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ es el valor de la función gamma para $\Gamma(x)$, para $x = 1 + \frac{1}{\beta}$

La función de tasa de fallo de la función de Weibull es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \quad (8)$$

Asumiendo que si $\gamma=0$ y sustituimos en (7):

$$\mu = E(\gamma) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (9)$$

Sustituyendo en (8) la función de tasa de fallos nos queda:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t)^{\beta-1} \quad (10)$$

Por otro lado la mediana viene dada por la siguiente expresión:

$$T = \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

La moda es:

$$M = \eta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

Y por último la desviación típica viene dada por:

$$\sigma_T = \eta \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \quad (13)$$

2.6.4.2 Influencia del parámetro β

Como anteriormente decíamos, este parámetro define la forma de una Distribución de Weibull. Algunas distribuciones como la exponencial o la normal, carecen de un parámetro de forma, ya que tienen formas predefinidas que no cambian.

Con la variación de este parámetro se producen efectos distintos en el comportamiento de la distribución:

- Si $\beta=1$

Obtenemos una función del tipo exponencial:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)} \quad (14)$$

dónde $\frac{1}{\eta} = \lambda = \text{Tasa de fallos}$

En la siguiente imagen podemos ver un ejemplo de los posibles valores que puede tomar la función de densidad para distintos valores de β :

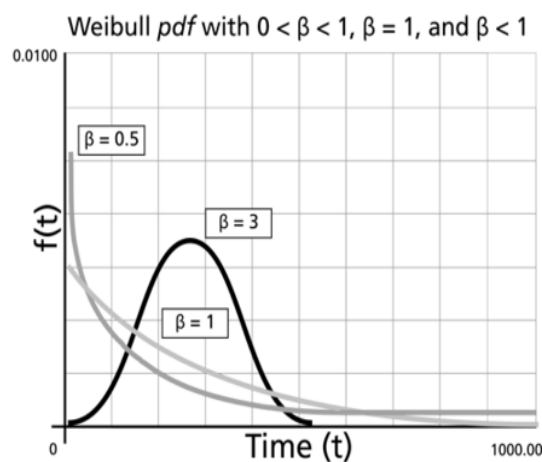


Figura 2.7. Gráfica de función de densidad en función del parámetro β .

Para $0 < \beta \leq 1$:

- $t \rightarrow \infty, f(t) \rightarrow 0$
- $t \rightarrow 0, f(t) \rightarrow \infty$
- $f(t)$ decreciente

Para $\beta > 1$

- $f(t) = 0$ cont = 0
- $f(t) \uparrow$ si $t \rightarrow M$ (la Moda) y disminuye a partir de ese punto.

Si $\beta < 2,6$

- La función de densidad de probabilidad de Weibull se

- extiende solo por el lado derecho.

$$2,6 < \beta < 3,7$$

- La función de densidad por el lado izquierdo no se extiende más allá de 0. Aprox. a distr. Normal.
- Para $\beta > 3,7$ la función de densidad se extiende por la izquierda.

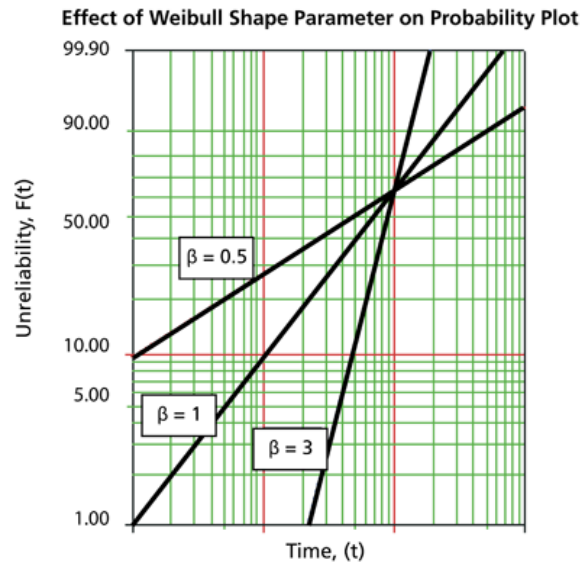


Figura 2.8. Gráfica de la β en la función de distribución, siendo la escala logarítmica.

La imagen describe el efecto. A medida que la β es mayor, mayor es la pendiente de la recta.

La forma en que el valor de β relaciona el comportamiento físico de las unidades modeladas, se ve mejor si observamos cómo afecta β a la fiabilidad y a la función de tasa de fallos:

- Efecto de la β en la función de fiabilidad:

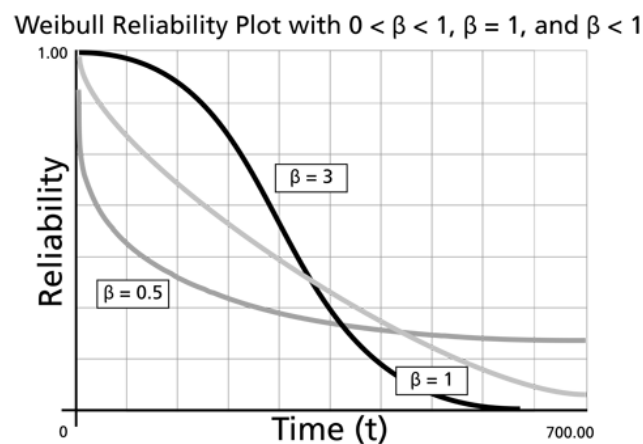


Figura 2.9. Gráfica de la β en función de la fiabilidad.
Figura de www.weibull.com

Para $0 < \beta < 1$

- $R(t)$ decrece bruscamente.

Para $\beta = 1$

- $R(t)$ decrece más suavemente que para el caso anterior.

Para $\beta > 1$

- $R(t)$ decrece cuando t aumenta.

- Efecto de la β en función de la tasa de fallos:

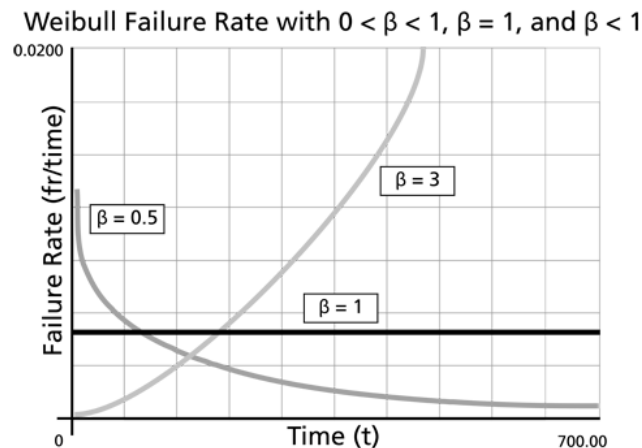


Figura 2.10. Gráfica de la β en función de la tasa de fallos.
Figura de www.weibull.com

Para $\beta < 1$,

- La tasa de fallos disminuye con el tiempo.

Para $\beta = 1$

- La tasa de fallos se mantiene constante.

Para $\beta > 1$

- La tasa de fallos incrementa con el tiempo.

Estos tres valores representan la curva de la bañera con la distribución de Weibull.

A continuación se puede obtener gráficas distintas modificando parámetro η manteniendo β y γ constantes:

2.6.4.3 Influencia del parámetro η

Es el parámetro más común, ya que la mayoría de las distribuciones suelen tener un parámetro de escala; en el caso de que la función de distribución sea de un solo

parámetro, suele ser el parámetro de escala. El parámetro de escala define alrededor de qué tiempos se concentra el mayor volumen de la distribución.

Si mantenemos el parámetro β constante y modificamos el parámetro η modificamos el eje de abscisas (tiempo) de la gráfica de función de densidad del modelo de Weibull como podemos ver en la siguiente figura:

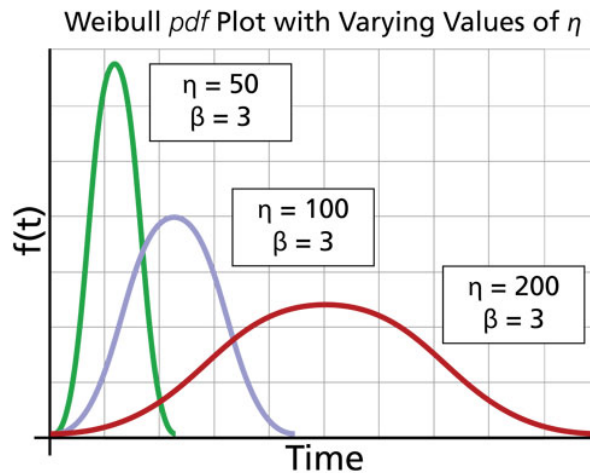


Figura 2.11. Gráfica de la fiabilidad en función de η .
Figura de www.weibull.com

Para $\beta = \text{cte}$, $\gamma = \text{cte}$ y $\eta \uparrow$

- La distribución se estira a la derecha y la altura disminuye manteniendo forma y lugar.

Para $\beta = \text{cte}$, $\gamma = \text{cte}$ y $\eta \downarrow$

- La distribución se estrecha a la izquierda y la altura aumenta.

η tiene las mismas unidades que T (horas, ciclos...)

El máximo de la función de densidad disminuye con el incremento de η .

2.6.4.4 Influencia del parámetro γ

Este parámetro define el lugar de origen de una distribución y puede ser positivo o negativo. Nos permite desplazar la función en una dirección o la contraria y representa un desplazamiento en el tiempo.

En la siguiente imagen observamos la influencia del parámetro γ en la función de densidad:

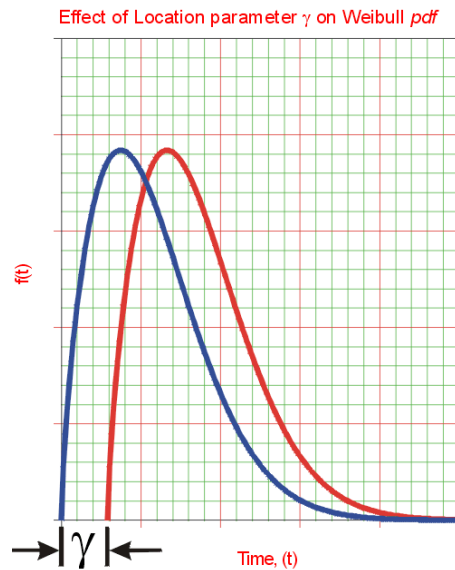


Figura 2.12. Gráfica de la fiabilidad en función de γ .
Figura de www.weibull.com

- Si $\gamma = 0$ la distribución comienza en $t=0$ u origen.
- Si $\gamma < 0$ la distribución comienza donde se ubica γ hacia la izquierda del origen.
- Si $\gamma > 0$ la distribución comienza donde se ubica γ hacia la derecha del origen.
- Proporciona una estimación del primer “time-to-failure” de las unidades bajo prueba.
- γ tiene las mismas unidades que T (horas, ciclos...)

El periodo de 0 a $+\gamma$ es el periodo libre de fallos.

2.6.4.5 Evaluación de los parámetros de Weibull

Para averiguar si una serie de datos de fallos siguen una distribución de Weibull y obtener los parámetros que los caracterice, es necesario linealizar la función de Weibull. Para linealizarla, para el caso de $\gamma=0$, se siguen los siguientes pasos:

$$\frac{1}{(1-F(t))} = e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

operamos tomando logaritmo neperiano dos veces:

$$y = \ln\left(\ln \frac{1}{1-F(t)}\right) \rightarrow x = \ln(t)$$

La representación de y con respecto a x es denominada representación gráfica de Weibull. Si la representación de y con respecto a x se ajusta a una recta, se puede deducir que la fiabilidad del elemento bajo ensayo sigue una distribución de Weibull. A

partir de la recta obtenida y mediante una regresión lineal se evalúan los parámetros de la distribución β que coincide con la pendiente y γ .

La forma tradicional de evaluar los parámetros de Weibull era utilizar el gráfico probabilístico de Weibull para realizar la representación de la probabilidad de fallo ($F(t)$), y extraer los parámetros de modo gráfico. Sin embargo, en la actualidad se utilizan herramientas de hojas de cálculo o, de forma más específica, herramientas estadísticas de fiabilidad para evaluar estos dos parámetros.

La figura siguiente muestra un ejemplo de trazado de probabilidad sobre este papel especial para gráficos de probabilidad.

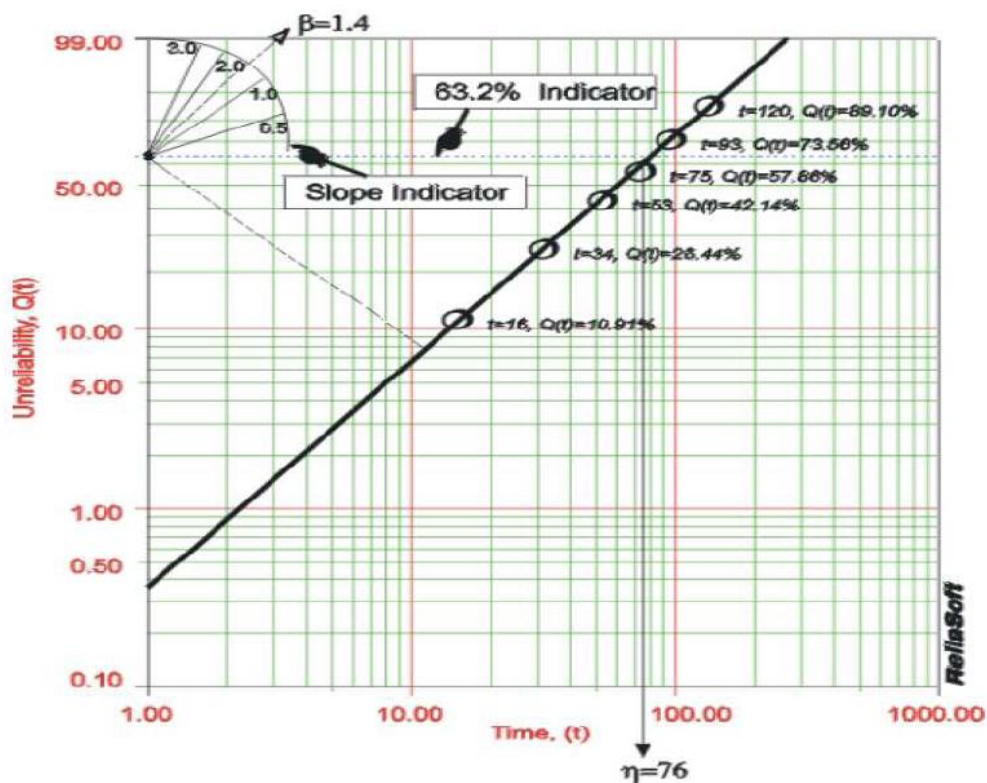


Figura 2.13 Ejemplo trazado Weibull
Figura de www.weibull.com

Este papel está construido en base a las transformaciones ya vistas anteriormente. El eje “y” representa la deficiencia en tanto por ciento y el eje “x” representa el tiempo. Ambos valores deben conocerse para cada tiempo de fallo que queremos representar sobre este tipo de papel.

2.7 CONCLUSIONES CAPITULO 2

En éste capítulo se han descrito los aspectos más importantes que estudian la fiabilidad de los componentes:

- En primer lugar se hace una introducción a la fiabilidad explicando la diferencia con el proceso de calidad. A través de un modelo matemático se asignan fórmulas a las definiciones y se describen sus principales características como la función de densidad y distribución. Al ser dependiente del tiempo, la fiabilidad añade el estudio de datos de supervivencia donde la variable temporal da lugar a distintos tipos de fallos según el periodo de vida en el que se encuentren.
- También se han descrito los modelos de distribución que más se utilizan en fiabilidad como son el normal, lognormal, exponencial y Weibull. En Weibull se hace especial hincapié ya que es la distribución que mas información proporciona.

CAPITULO 3

ENSAYOS DE FIABILIDAD

3 Ensayos de fiabilidad

Para la aplicación de todos los modelos estadísticos mostrados en el capítulo anterior es necesario disponer de datos de tiempos de fallo. Estos datos de tiempos de fallos se pueden conseguir en campo en productos que ya están comercializados o de ensayos planificados expresamente para ello previamente a su comercialización.

Para estudiar este comportamiento es necesaria la realización de ensayos de fiabilidad que evalúen el diseño, el desarrollo, la calidad y el servicio que a continuación describiremos los más importantes de forma breve.

3.1 Clases de ensayos de fiabilidad

- Ensayos de medición y demostración de la fiabilidad.

El ensayo consiste a partir de los tiempos de fallos evaluar la fiabilidad del producto o demostrar si cumple un objetivo dado. Un contraste estadístico puede demostrar con cierto nivel de confianza que el dispositivo lo cumple.

- Ensayos de medición de la variación de los parámetros.

Consisten en mediciones sucesivas de los parámetros que determinan las prestaciones de un producto a lo largo de extensos periodos de funcionamiento. La variación observada entre los parámetros dependientes del envejecimiento en función de los esfuerzos, del tiempo y de las unidades de una muestra se traducirán en distribuciones estadísticas.

- Ensayos de investigación de los modos y mecanismos de fallo.

A partir de ensayos de fiabilidad se analizan las condiciones físicas del fallo de los componentes para mejorar el diseño. La aplicación de aceleramiento de ensayos puede provocar la aparición de nuevos fallos e incluso la eliminación de normales.

- Ensayos de cribado de componentes.

Elimina las unidades que fallan en el período infantil y aquellas que presentan síntomas de vida de corta. A modo de ejemplo, esto no es otra cosa que la supervivencia de los individuos más fuertes. Desde el punto de vista electrónico se somete a un ensayo de envejecimiento a todos los componentes reteniendo a los más aptos para el servicio donde los componentes que no acusen una tasa de fallo decreciente no serán sometidos a una purga que suele estar entorno a una semana (168 horas).

- Ensayos de duración de vida.

Exige mantener en funcionamiento bajo ciertas condiciones ambientales una muestra hasta que fallen todas o parte de las unidades. La finalidad es estimar los parámetros de la distribución de vida de la muestra.

- Ensayos acelerados

Consiste en disminuir el tiempo de vida del producto a ensayar aumentando los niveles de esfuerzo como pueden ser la temperatura, la corriente u otras. La relación entre el tiempo de vida en condiciones normales de funcionamiento y en el ensayo acelerado se denomina factor de aceleración y se evalúa mediante modelos de aceleración.

Sin embargo un problema que puede aparecer, es que el ensayo acelerado puede dar lugar a nuevos mecanismos de fallo que no ocurren durante el funcionamiento normal del producto. Tomar seriamente tales mecanismos de fallos puede dar lugar a rediseños importantes que no aportan ningún beneficio desde el punto de vista de las exigencias originales del producto.

Es esencial aplicar un criterio técnico en la planificación de los ensayos de la fiabilidad, así como el equilibrio de los factores de duración del ensayo donde todos los resultados serán apuntados con detalle.

Como modelo de aceleración más utilizado vamos a detallar brevemente el modelo de aceleración Arrhenius en temperatura:

3.2 Modelo de aceleración en temperatura Arrhenius

La ley de Arrhenius relaciona la velocidad de una reacción química con la temperatura. Generalmente pretende relacionar el comportamiento de un dispositivo con la temperatura.

Este modelo, muy utilizado en ensayos acelerados, es una medida del efecto que la temperatura tiene sobre la reacción y se describe mediante la siguiente ecuación:

$$R(T) = Ae^{-\frac{E_a}{KT}}$$

donde:

- R, es la velocidad de reacción.
- A, es una constante que depende del mecanismo de fallo, a determinar.
- Ea, es la energía de activación (eV).
- K, es la constante de Boltzman = $8.617385 \cdot 10^{-5}$ (eV/°K).
- T, es la temperatura absoluta en °K.

Además el modelo de la vida de estrés de Arrhenius se formula asumiendo que la vida es proporcional a la reacción inversa del proceso.

Se modela mediante la siguiente ecuación:

$$L(V) = Ce^{\frac{B}{V}}$$

- L, representa una medida de vida cuantificable.
- V, representa el nivel de estrés/tensión.
- C, es uno de los parámetros del modelo a ser determinado, (C>0).
- B, es otro de los parámetros del modelo a ser determinado.

Una ventaja que presenta el modelo de Arrhenius es que se puede combinar con los modelos de distribución lognormal, exponencial y Weibull para obtener mas datos en el análisis de la fiabilidad.

A modo de ejemplo práctico, la siguiente imagen muestra un ensayo acelerado en una cámara climática que simula condiciones climáticas de 85°C y 85% HR (humedad relativa) cuyo objetivo es la degradación de tres tiras de diodos LED de alto brillo alimentados cada tira a diferentes corrientes nominales (10, 20 y 40 mA):



Figura 3.1. Ensayo en cámara climática de LEDs rojos de alta luminosidad

3.3 Ensayos acelerados de vida

Los siguientes puntos añaden más información al estudio de ensayos acelerados:

3.3.1 Ensayos Cualitativos

Este tipo de ensayos proporciona información únicamente sobre los modos de fallo. Se requieren pocas muestras de componentes que serán sometidas a un nivel, o varios, de estrés. Los componentes que sobrevivan, son los que pasan el test, y los que fallan, se analizan sus mecanismos de fallo con el objetivo de minimizarlos en futuros diseños; de este modo se puede mejorar el diseño de un producto eliminando las causas que producen el fallo.

Inicialmente se utilizaron para descubrir posibles modos de fallo; sin embargo, si no se dispone de un diseño de ensayo apropiado, es muy difícil encontrar la causa real de fallo. Un buen ensayo cualitativo revela eficazmente los modos de fallos posibles durante la vida de un producto en condiciones normales.

El inconveniente de este tipo de ensayos es que no proporcionan información cuantitativa sobre la fiabilidad de un producto.

3.3.2 Ensayos cuantitativos

Los ensayos acelerados cuantitativos sirven para cuantificar la ley de vida de un producto funcionando en condiciones normales y proporcionar información de su fiabilidad, como la determinación de la probabilidad de fallo, la vida media, la tasa de fallos y los costes de la fiabilidad.

Pueden realizarse utilizando dos métodos: uno mediante uso de la tasa de aceleración, haciendo trabajar al componente de forma continua y el otro mediante ensayos acelerados que se consiguen con unas condiciones de esfuerzo superiores a las normales de funcionamiento.

Mediante la utilización de tasa acelerada se obtiene información que puede analizarse mediante los métodos típicos de los datos de vida.

Para todos los ensayos, la información deseada es la referente al tiempo de fallo de un producto a través de la observación del evento fallo. La mayoría de los componentes o sistemas pretende realizar sus funciones de forma satisfactoria durante largos periodos de tiempo.

Los dos métodos de aceleración comentados son muy adecuados para obtener la información necesaria del producto antes de que acabe su tiempo de vida.

3.3.2.1 Método de tasa de aceleración

Para productos que no funcionan continuamente puede aumentarse el tiempo de funcionamiento para obtener los datos de fiabilidad de ese producto; es conocido como aumento de la tasa de aceleración.

Otro método de tasa de aceleración es considerar el efecto del estrés al que son sometidas las unidades, encontrar cambios de encendido y apagado para ciertas unidades, o el sobrecalentamiento debido al uso continuo. Hay que tener en cuenta todos estos efectos que puedan aparecer.

La limitación de uso de este método de tasa acelerada se alcanza cuando los productos requieren un uso tan elevado para ver posibles fallos que con estos métodos de aceleración se tardaría mucho en observar posibles defectos en este tipo de productos. En estos casos se debe aplicar el método llamado aceleración por sobreesfuerzo.

3.3.2.2 Aceleración por sobreesfuerzo

Para acelerar la vida de productos de un uso muy elevado de forma continua, hay que someterlos a unos niveles de esfuerzo mayores de los que soportan en las condiciones habituales de funcionamiento. Los datos de tiempos de fallo obtenidos bajo esas condiciones de esfuerzo pueden extrapolarse a las condiciones normales de funcionamiento mediante modelos de aceleración de vida. Los ensayos de vida acelerados pueden realizarse a altas o bajas temperaturas, humedad, tensión, presión, vibración o mediante la combinación de ambos. De esta forma pueden acelerar la vida de los productos que requieren de este tipo de ensayos.

Los niveles de esfuerzo no deben introducir nuevos mecanismos o modos de fallos que no aparecen en condiciones normales de funcionamiento. Normalmente, estos niveles de

esfuerzo se encuentran fuera de la especificación del producto pero dentro de los límites del diseño.

3.3.2.3 Análisis de datos

El análisis de datos de vida determina, mediante el uso de distribuciones estadísticas, la distribución de vida que describe los tiempos de fallo de un producto donde se pretende analizar la función de densidad de probabilidad de los tiempos de fallo, en condiciones normales de uso del producto. Una vez que se ha obtenida esta función, se puede calcular la fiabilidad deseada de ciertos aspectos del producto como son: porcentaje de fallo bajo garantía, valoración de riesgos, comparación de diseño, periodo de desgaste.

En el análisis de datos de vida puede determinarse fácilmente la función de densidad de probabilidad de los tiempos de fallo en condiciones normales, utilizando tiempos de fallo/suspensión de dato y la función de distribución, tales como la distribución de Weibull, exponencial, etc.

Para extrapolar los datos de vida obtenidos en los ensayos acelerados, a las condiciones normales de uso, se necesita un modelo que permita extrapolar los datos recogidos en condiciones aceleradas para llegar a una estimación de las características durante el nivel de uso. Existen diferentes modelos en función del esfuerzo seleccionado para acelerar el ensayo y que permitan obtener los resultados del ensayo acelerado a condiciones normales de funcionamiento.

Durante los ensayos de vida acelerados, definidos en unas condiciones de esfuerzo mayores que aquellas a las que se ve sometido el producto en su uso habitual, los datos obtenidos pueden utilizarse para obtener la función de densidad de probabilidad en esas condiciones de estrés y poder así hacer estimaciones y predicciones del comportamiento de ese producto, pero en unas condiciones de estrés mayores.

Habitualmente, la utilización de los modelos de extrapolación requiere un mínimo de dos niveles de esfuerzo para realizar una extrapolación correcta.

3.3.3 Niveles de esfuerzo

Uno de los aspectos más discutidos para la realización de ensayos acelerados, es considerar un nivel de esfuerzo constante con respecto al tiempo para las unidades que se deben estresar. Estos se pueden clasificar en función de la dependencia del nivel de esfuerzo con respecto al tiempo. Existen dos posibles esquemas de niveles de esfuerzo: cuando es independiente del tiempo y cuando son independientes del tiempo. Esto provoca que el análisis matemático, modelos y suposiciones varíen dependiendo de la relación tiempo-esfuerzo.

3.3.3.1 Independientes del tiempo

Cuando el nivel de esfuerzo es independiente del tiempo, el esfuerzo aplicado a la muestra no varía; por ejemplo, si la temperatura supone un esfuerzo térmico, cada unidad será sometida a las mismas condiciones de esfuerzo de temperatura.

Algunas ventajas del nivel de esfuerzo constante sobre los niveles de esfuerzo dependientes del tiempo son:

- Para la mayoría de los productos se supone que en condiciones normales de funcionamiento el esfuerzo al que están sometidos es constante.
- Es más fácil realizar ensayos con niveles de esfuerzo constantes.
- Es más fácil cuantificar un ensayo de nivel de esfuerzo constante.
- Existen modelos para el análisis de los datos obtenidos.
- La extrapolación de los datos obtenidos para este tipo de nivel de esfuerzo es más exacto.

3.3.3.2 Dependientes del tiempo

Productos sujetos a niveles de esfuerzo dependientes del tiempo originarán fallos más rápidamente, y los modelos a los que se ajustan son considerados por muchos como el objetivo de los ensayos de vida acelerados, ya que en un único ensayo se puede conseguir mucha más información. Normalmente las unidades de las muestras para ensayar son sometidas durante intervalos de tiempos a un estrés constante, cambiando a otro nivel de estrés cuando ese intervalo de tiempo termina, normalmente de forma incremental.

3.4 Planificación de ensayos de fiabilidad

Para determinar un programa de ensayos se determinan los siguientes aspectos:

1. Definición del dispositivo a ensayar. Descripción de su funcionamiento y definir lo que constituye un fallo.
2. Requisitos de fiabilidad. Valores especificados para la medida de fiabilidad (porcentaje de éxitos, vida media, tasa de fallos, etc.)
3. Condiciones ambientales de ensayo. Factores ambientales y sus niveles.
4. Procedimientos operativos. Instrucciones y especificaciones de manejo del dispositivo y del equipo de ensayo. Mantenimiento preventivo a aplicar, si corresponde, al dispositivo.
5. Métodos estadísticos. Hipótesis de distribución. Diseño estadístico del experimento. Selección de un plan de muestreo ya existente o diseño de uno especial.
6. Registro, análisis y explotación de datos. Cálculos necesarios para la estimación de parámetros o contraste de hipótesis.
7. Análisis de fallos. Determinación de modos, mecanismos, causas de fallos.
8. Informes de fallos.
9. Informes de ensayo.
10. Costes de ensayo. Muestra, equipos, personal.

3.5 CONCLUSIONES CAPITULO 3

Este capítulo sirve como introducción para describir el capítulo 4 que analiza el ensayo realizado en el laboratorio.

Se analiza la introducción a los tipos de ensayos en fiabilidad:

- Primero se hace una clasificación con distintos tipos de ensayos hasta llegar al ensayo acelerado
- También se hace una clasificación de los ensayos acelerados y se estudia la influencia de los parámetros temporales y climatológicos como principal influencia en el análisis de datos.
- Por último se hace una planificación de los ensayos acelerados.

Dependiendo del tipo de ensayo acelerado que realizamos habrá que estimar una serie de parámetros que afectan a sus propiedades.

CAPITULO 4

DESCRIPCION DEL ENSAYO

4 Descripción del ensayo

El presente capítulo describe la parte experimental del Proyecto Fin de Carrera y la hemos desglosado en los siguientes puntos:

- Metodología del ensayo
- Banco de pruebas: Mecanizado de diodos LEDs y puesto a punto hornos
- Instrumentación Hardware
- Software

En el ensayo acelerado se han desarrollado dos puestos de trabajo diferentes con el objetivo de evaluar la fiabilidad de dos modelos distintos de diodos ultravioleta de alta potencia del mismo fabricante a tres condiciones de temperatura diferentes donde y dos modos de trabajo:

En el puesto uno de trabajo, se ponen los LEDs UV en funcionamiento a alta temperatura tanto con ciclos de corriente continua como con ciclos alternos de corriente controlados por Labview.

En el segundo puesto se hizo un seguimiento de las curvas I-V mediante Labview, la potencia lumínica mediante un software encargado de medir el espectro de los diodos, y se tomaron fotos con microscopio para ver la degradación de los encapsulados y poder hacer las conclusiones pertinentes.

4.1 Metodología del ensayo

En la metodología del ensayo se utilizan dos puestos de trabajo.

En el primer puesto de trabajo se realiza el ensayo acelerado. El ensayo acelerado comienza con la introducción a los diodos con el disipador en los hornos. Una vez introducidos, se utiliza un software programado en Labview para elegir los parámetros de número de ronda y tiempo de ensayo.

Una vez establecidos estos, los diodos permanecen en estado de degradación bajo inyección de corriente a 600 mA, que corresponden con el 85% de la corriente nominal, y a una temperatura que dependerá de la cámara donde hayan sido introducidos (60 °C, 75°C o 90°C).

Cada serie de diodos está sometida a dos tipos de ciclos de trabajo:

- La primera mitad de diodos trabajan en funcionamiento continuo donde la inyección de corriente es constante.
- La otra mitad de los diodos con ciclos alternos de corriente permaneciendo encendidos 30 segundos y 30 apagados.

La conmutación de los relés de la tarjeta permite programar estos dos modos de funcionamiento.

En el segundo puesto de trabajo se realiza la caracterización de los LEDs fuera del horno. Una vez finalizado el tiempo de degradación, los diodos se dejan enfriar durante

20 minutos fuera del horno para realizar la medida de la potencia lumínica de cada uno de los LEDs UV. Se mide el espectro mediante un software y un espectrómetro compuesto por una esfera hueca y conectada a fibra óptica al dispositivo.

Por último se realiza la medición de la curva I-V de cada diodo con un programa de Labview para ver el estado de degradación.

Una vez obtenidos todos los datos vuelven a meterse los diodos a los hornos en el primer puesto de trabajo.

El siguiente esquema resume una sesión de ensayo:

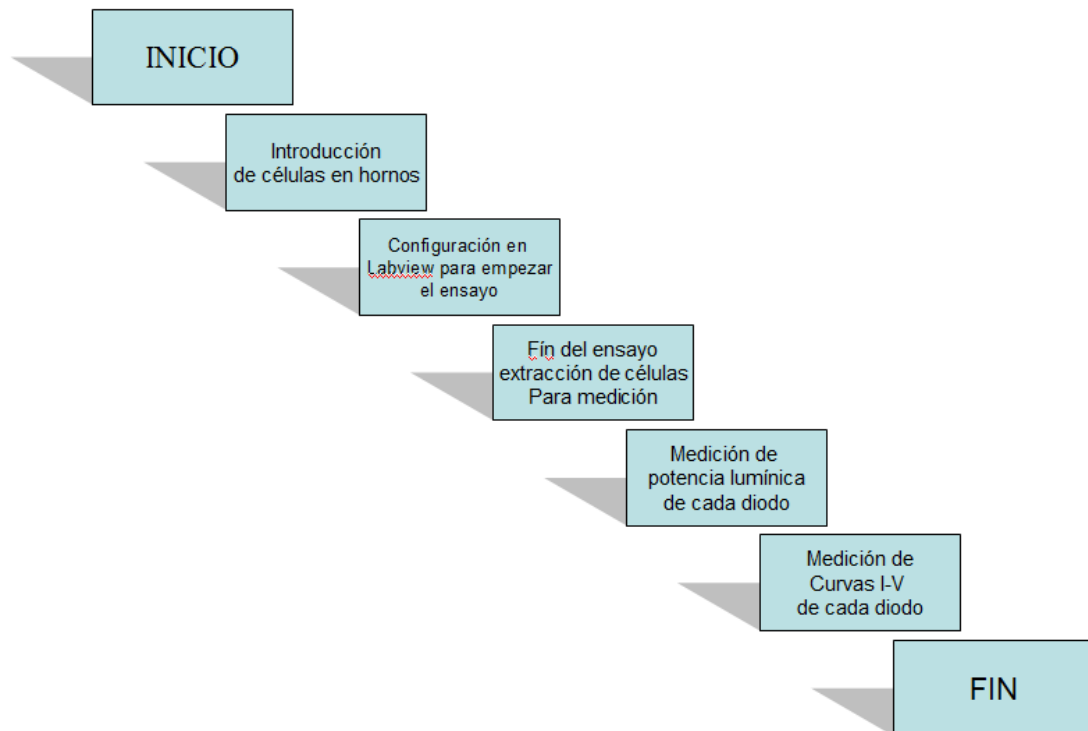


Figura 4.1. Esquema de la planificación del ensayo durante el laboratorio

4.2 Banco de pruebas

En este apartado mostramos el proceso de elaboración de los elementos de instrumentación o herramientas. Los principales procesos que se describiremos son el mecanizado de los diodos UV, el soporte de Aluminio para realizar las mediciones y la puesta a punto de los hornos.

4.2.1 Mecanizado de los diodos UV

Los LEDs UV de alta potencia elegidos se emplean para el curado, la impresión, la esterilización de agua, la verificación de los billetes y diversas aplicaciones médicas.

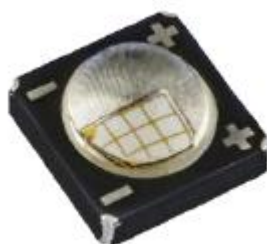


Figura 4.2. Tipo I de LED UV

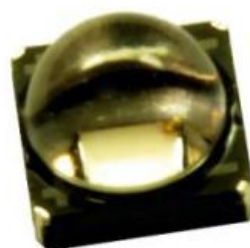


Figura 4.3. Tipo II de LED UV

Los LEDs, que hemos denominado Tipo I y Tipo II, presentan características similares:

- Longitud de onda de 365nm
- Alta luminosidad
- Lente de cristal
- Resistencia térmica muy baja(4.2°C/W)
- Soldadura por reflujo(al menos 6 ciclos)

Cada uno se compone de un chip diferente, silicona transparente que favorece la emisión de luz evitando el amarilleamiento de la lente y por último un recubrimiento de cristal para proteger el chip de la temperatura, humedad o golpes.

El chip del LED tipo I dispone de una malla de metalización que divide el chip en celdas, mientras que el tipo II está dividido mediante una metalización horizontal. Estas diferentes metalizaciones afectan al calentamiento de la silicona lo que dará lugar a una degradación del encapsulado completamente diferente para cada tipo de LED.

Los valores máximos en los que operan los diodos son los que aparecen en las siguientes tablas tomadas de la hoja de características del fabricante:

Tipo I

Absolute Maximum Ratings

Table 4:

Parameter	Symbol	Value	Unit
DC Forward Current ^[1]	I_F	1000	mA
Peak Pulsed Forward Current ^[2]	I_{FP}	1000	mA
Reverse Voltage	V_R	See Note 3	V
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +150	°C
Junction Temperature	T_J	115	°C
Soldering Temperature ^[4]	T_{sol}	260	°C
Allowable Reflow Cycles		6	

Tabla 4.1. Parámetros máximos del diodo Tipo I

Tipo II

Absolute Maximum Ratings

Table 4:

Parameter	Symbol	Value	Unit
DC Forward Current at $T_{jmax}=100^{\circ}\text{C}$ ^[1]	I_F	700	mA
Peak Pulsed Forward Current ^[2]	I_{FP}	850	mA
Reverse Voltage	V_R	See Note 3	V
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +150	°C
Junction Temperature	T_J	100	°C
Soldering Temperature ^[4]	T_{sol}	180	°C
Allowable Reflow Cycles		6	

Tabla 4.2. Parámetros máximos del diodo Tipo II

Para nuestro ensayo escogimos una corriente de 600 mA para ambos tipos de LED que es menor que los valores máximos especificados por los fabricantes.

Al emplear corrientes tan grandes el fabricante recomienda escoger como disipador una MCPCB (Metal Core Printed Circuit Board), esto es un pequeño sustrato sobre el que se pone el diodo LED con una resistencia térmica de $1.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

En las siguiente figuras se puede ver el diodo LED con el sustrato disipador:



Figura 4.4. . Diodo Tipo I con sustrato

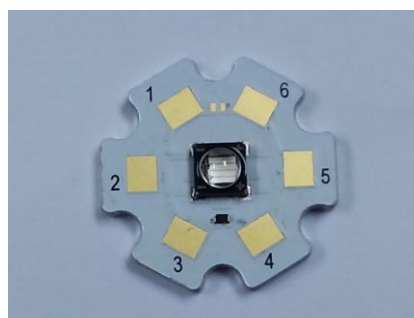


Figura 4.5. Diodo Tipo II con sustrato

El siguiente paso fue soldar el terminal positivo (4,5 y 6) y el negativo (1,2 y 3) al diodo LED. Se empleó un soldador y una cinta encargada de calentar el diodo LED para poder alcanzar la temperatura adecuada y poder realizar la soldadura guiándonos por las figuras del perfil de soldadura del datasheet:

Reflow Soldering Profile

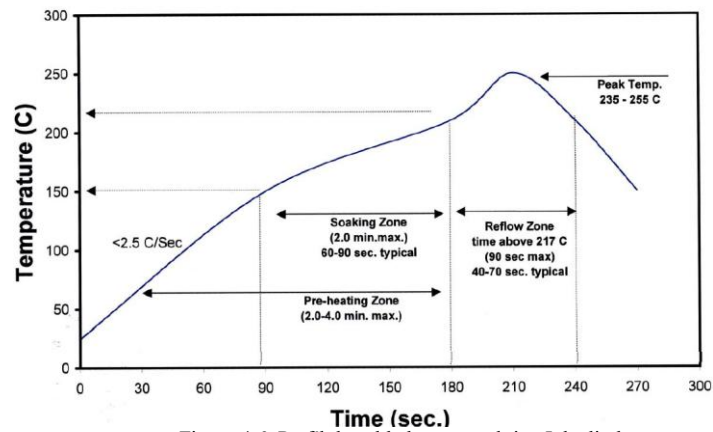


Figura 4.6. Perfil de soldadura para el tipo I de diodo

Reflow Soldering Profile

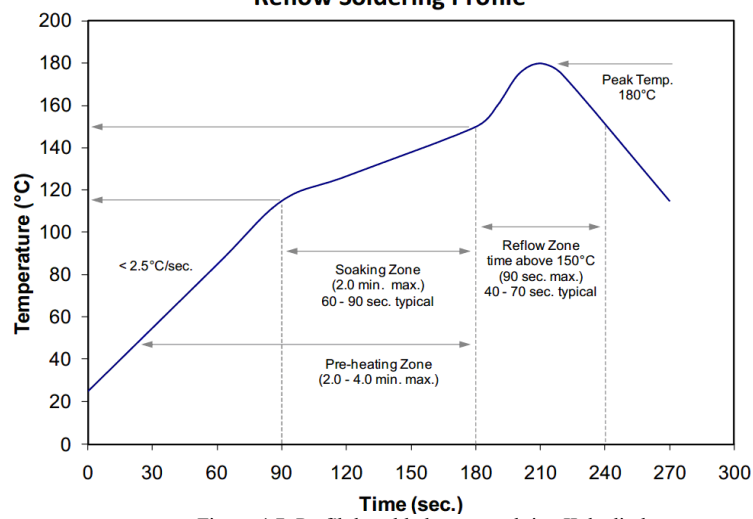


Figura 4.7. Perfil de soldadura para el tipo II de diodo

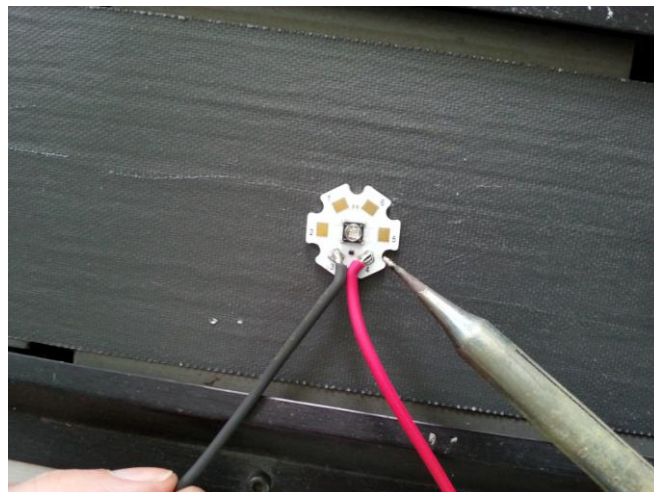


Figura 4.8. Soldadura de cables sobre diodo

Este bloque a su vez va atornillado con arandelas evitando el contacto con las trazas eléctricas a un radiador encargado de disipar el calor producido en el chip del LED con el objetivo de aumentar la fiabilidad del LED.

En la siguiente figura se puede ver el disipador de calor:

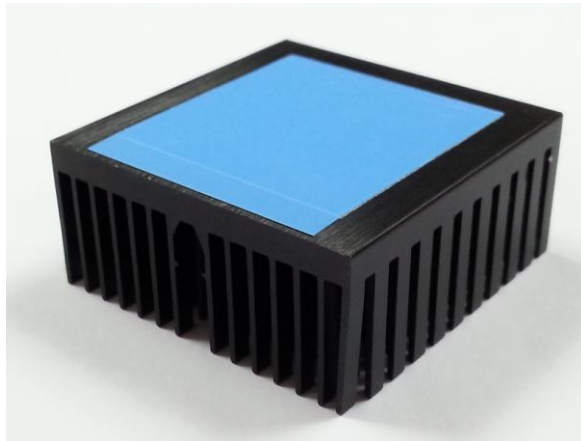


Figura 4.9. Aspecto físico del disipador térmico de cada diodo

Por último el montaje final de cada LED queda de la siguiente manera:

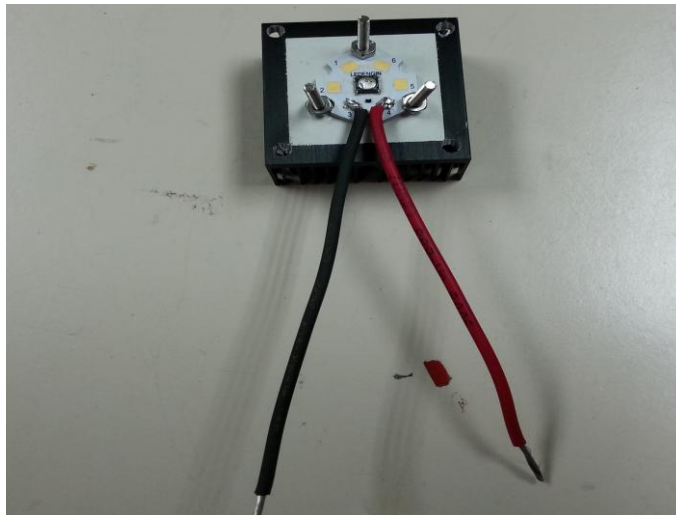


Figura 4.10. Aspecto físico final de un diodo LED con disipador

Este proceso se repitió para cada uno de los LEDs, 11 veces para los diodos del tipo I y 11 veces para los del tipo II. En total se elaboraron tres series de diodos, una para cada horno que se encuentra a una temperatura, enumerados para poder hacer un seguimiento alternando ambos tipos en los tres hornos de ensayo atornillados a un conector eléctrico.

La siguiente figura muestra la conexión de las células LED en una clema para ser previamente sometidas a ensayo:

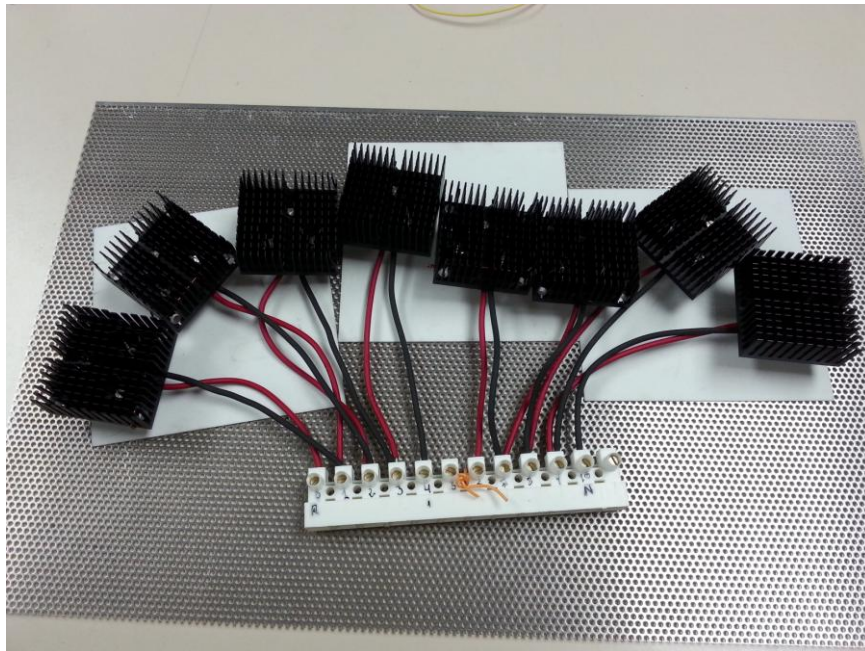


Figura 4.11. Conjunto de LEDs con disipador y sistema de conexiones empleado para el horno de 60°C

4.2.2 Mecanizado del soporte de Aluminio

Para estandarizar las medidas espectrales se fabricó un soporte de aluminio forrado con cinta adhesiva negra en las partes más conflictivas que pueden reflejar luz UV sobre la esfera integradora.

En la siguiente figura vemos el aspecto físico del soporte de Aluminio junto a un diodo previamente a ser medido:



4.12. Aspecto del soporte de aluminio junto a un LED ya montado con disipador

Dado que el espectrómetro es muy sensible a los cambios de luz se decidió utilizar una caja de cartón para tapar el soporte y evitar que la propia luz del laboratorio influyese a la hora de realizar las medidas. De lo contrario observamos que el pico máximo del espectro aumentaba en número de cuentas por longitud de onda falseando las medidas.

4.3 Hornos de ensayo

Se emplearon tres hornos de temperatura programable para poder realizar los ensayos. Dentro van introducidas el conjunto de LEDs con disipador y sistema de conexiones mostrado en la Figura 4.13.

Para tener una buena maniobrabilidad con las células LED y para que no afecte el flujo de aire producido por el ventilador de la cámara, se decidió mecanizar una caja de aluminio formada por una base y una tapa que será introducida dentro del horno.

Para los ensayos a 90°C se emplearon tres diodos del tipo I y otros tres del tipo II numerados de la siguiente manera:

90°C	Nº diodo	Tipo
	6	I
	11	I
	5	II
	6	II
	7	I
	7	II

Tabla 4.3. Numeración de LEDs a 90°C

El siguiente horno se empleó para degradar los diodos a 90°C dentro de la caja de aluminio:



Figura 4.13. Aspecto físico del horno Binder a 90°C

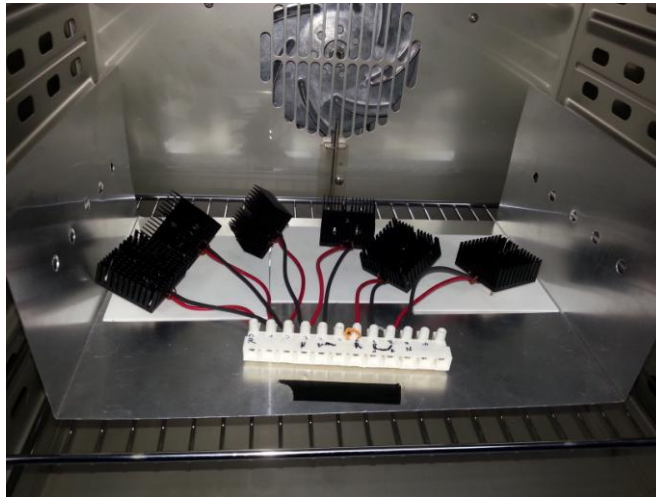


Figura 4.14. LEDs con disipador y conexiones dentro de la caja de aluminio abierta



Figura 4.15. Descripción visual del ensayo a 90°C con la caja de aluminio cerrada

El siguiente horno se empleó para degradar los diodos a 75°C dentro de la caja de aluminio:



Figura 4.16. Horno con LEDs y conexiones en el interior



Figura 4.17. Horno con células en el interior



Figura 4.18. Funcionamiento de las células dentro de la caja

Para los ensayos a 75°C se emplearon cuatro diodos del tipo I y otros cuatro del tipo II clasificados de la siguiente manera:

75°C	Nº diodo	Tipo
	8	I
	13	I
	8	II
	13	II
	10	I
	12	I
	11	II
	12	II

Tabla 4.4. Clasificación de células a 75°C

El siguiente horno se empleó para degradar los diodos a 60°C.



Figura 4.19. Aspecto del horno funcionando a 60°C de marca Selecta



Figura 4.20. Horno funcionando a 60°C

Como diferencia respecto a los anteriores hornos, este no dispone de ventilador y no hizo falta introducir las células LED en una caja de aluminio.

Para los ensayos a 60°C se emplearon cuatro diodos del tipo I y otros cuatro del tipo II clasificados de la siguiente manera:

60°C	Nºdiodo	Tipo
	2	I
	3	I
	1	II
	2	II
	4	I
	5	I
	3	II
	4	II

Figura 4.5. Clasificación de células a 60°C

4.4 Instrumentación Hardware

A continuación se describe la instrumentación empleada en cada puesto de trabajo durante los ensayos acelerados junto con las principales características técnicas. También muestra un esquema de conexión de los equipos utilizados en el puesto uno de medidas del laboratorio.

4.4.1 Instrumentación Hardware puesto 1

A continuación se describe la instrumentación empleada en el puesto 1 para alimentar el sistema y ponerlo en funcionamiento, que parte de una configuración que realizaron los alumnos: Jorge Ramírez García y Jorge García-Mochales Martínez en su proyecto fin de carrera “Instrumentación de referencia para realización automática de ensayos de fiabilidad”

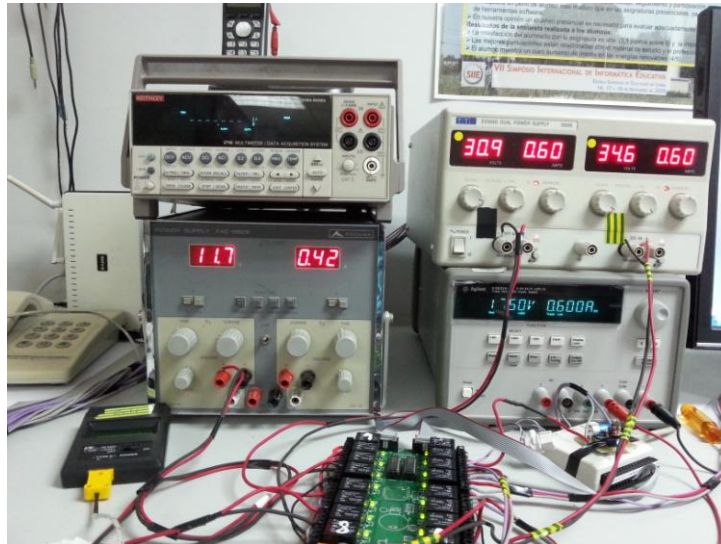


Figura 4.21. Instrumentación utilizada en el puesto 1.

En la siguiente figura vemos la conexión del sistema:

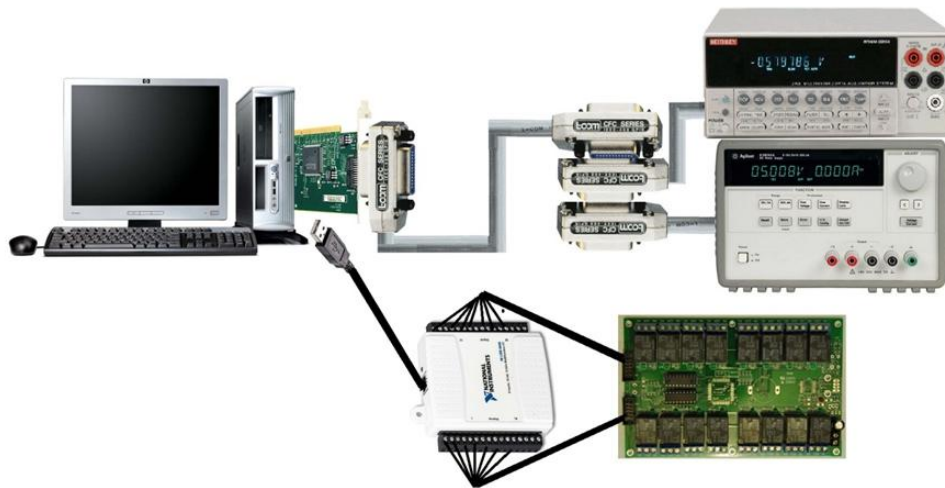


Figura 4.22. Sistema de conexión utilizado en el proyecto fin de carrera de los Jorges.

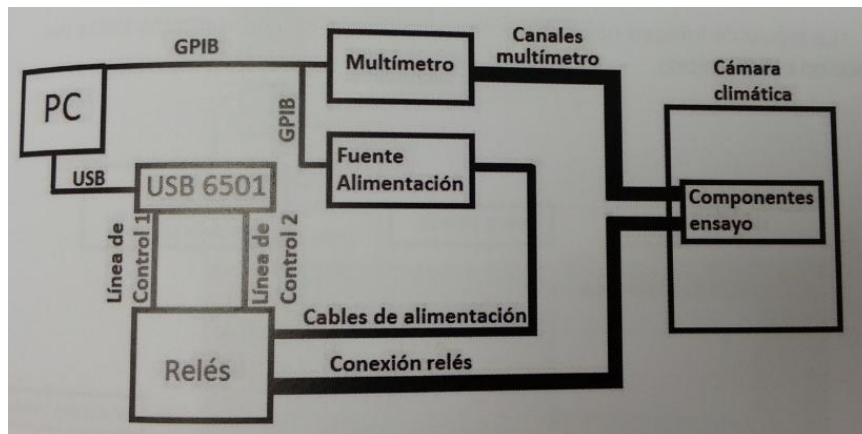


Figura 4.23. Diagrama de bloques utilizado en el proyecto fin de carrera de los Jorges.

4.4.1.1 Tarjeta de adquisición de datos Keithley 7700

Es una tarjeta de expansión para el sistema de adquisición de datos Keithley 2700, que proporciona 20 canales de medida. En nuestro caso irán conectados a cada LED a través de la clema de conexión y una PT-100:



Figura 4.24. Aspecto físico de la tarjeta Keithely 7700

Las características principales de esta tarjeta son:

- 20 canales de medida de propósito general.
- Canales de medida de solo corriente.
- Permite medidas a 2 (20 canales) o 4 hilos (10 canales).
- Cada canal (1-20) soporta 300V y 1 A. 60W 125VA.
- Los canales de corriente (21,22) soportan hasta 60 V y 3A. 60W 125VA.
- Tiempo de conmutación menor a 3 ms.
- Relés de cierre electromecánico.
- El cierre de los relés está almacenado en la memoria de la tarjeta.

En la siguiente figura vemos cómo están distribuidos los relés y qué relés tenemos que conmutar para realizar la medida por el canal que necesitemos.

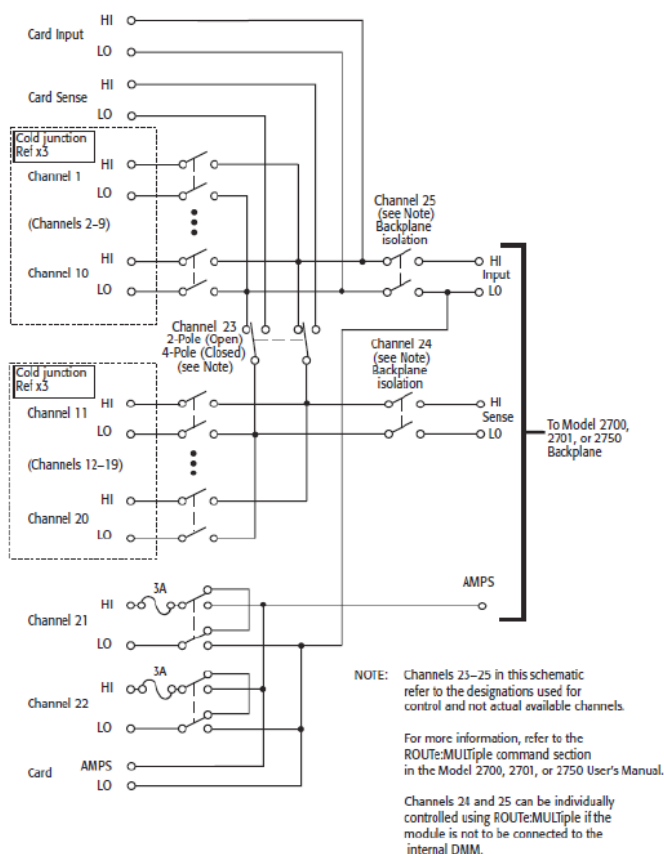


Figura 4.25. Esquema interno de la tarjeta Keithley 7700



Figura 4.26. Conexión de la tarjeta Keithley 7700

4.4.1.2 Fuente de alimentación dual FAC 66-2B

Se configuró en modo independiente para alimentar la tarjeta de relés a 11.8 V y a 0.42 A.



Figura 4.27. Aspecto físico de la fuente de alimentación FAC 66-2B

4.4.1.3 Tarjeta de relés

Es una tarjeta que consta de 16 relés de la marca OMRON (G5LA) de 12 V. Se controlan individualmente conmutando a partir de señales con niveles TTL.

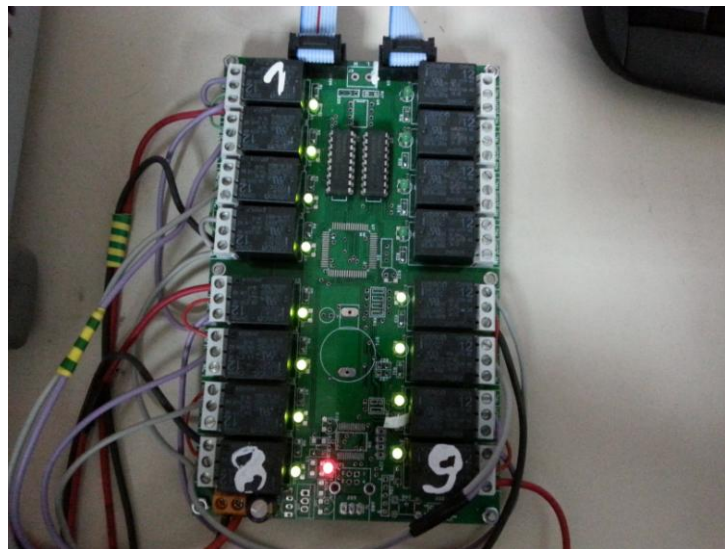


Figura 4.28. Aspecto físico de la tarjeta

Se utiliza para el control de la alimentación de las células de diodos. Es necesario ir conmutando la alimentación sobre las tres series de diodos para diferenciar entre los tres estados: degradación, reposo y los diferentes estados por los que pasan, o para aislar diferentes canales y poder realizar las medidas que deseemos sin necesidad de tener en cuenta los circuitos conectados.

Sus principales características son:

- $V_{cc}=12V$
- Los relés soportan 240 V @ 10 A en NO (Normally Open) y 5 A en NC (Normally Close).
- Los 3 contactos del relé (NO, COM and NC) son accesibles en los laterales de la tarjeta. Cada contacto está marcado con sus iniciales para diferenciarlos.
- El LED indicador de la posición de los relés muestra la señal digital que ha recibido el relé para que este actúe en consecuencia; así, si se coge la salida NO y el LED está encendido, la salida estará cerrada.
- Señal de control de entrada digital compatible con lógica TTL (0 / 5 VDC).
- Señal de control de entrada digital mediante 2 conectores de 10 pines.
- Diodo de protección ante polarización inversa de la alimentación.

4.4.1.4 USB 6501 de National Instruments

Este dispositivo de Entrada/Salida se conecta a la tarjeta de 16 relés y se utiliza mediante software.

El control se realiza sobre los relés que funcionan como interruptores y permiten tomar las medidas sobre los LEDs de manera individual.



Figura 4.29. Aspecto físico del USB 6501

La siguiente figura representa la asignación de pines, esto nos permite conocer como se han de hacer las conexiones entre el dispositivo USB y la tarjeta de relés:

Las características principales de este dispositivo de E/S son:

- 24 líneas de E/S digitales.
- Contador de 32 bits.
- Nivel Lógico TTL.
- Protección de sobre tensión.
- Capacidad de corriente simple de 8,5 mA.
- Capacidad de corriente total de 65 mA.
- Terminales de tornillo integradas o conector genérico de 34 pines.
- Interfaz de bus USB 2.0 (12Mb/s).
- Alimentado por USB.

4.4.1.5 Interfaz de comunicaciones GPIB

GPIB (General Purpose Interface Bus) es un estándar de conexión que permite la comunicación a alta velocidad de un ordenador con equipos electrónicos de distintos proveedores. En nuestro caso lo utilizamos para conectar el multímetro Agilent 34410 al PC.



Figura 4.30. Aspecto físico del cable GPIB



Figura 4.31. Adaptador IEEE-488 GPIB

El controlador se asegura de evitar la concurrencia de transmisión; además, supervisará todas las operaciones que se realizan en el bus, determinando el dispositivo que envía la información (mediante el parámetro del protocolo de conexión, asignación de direcciones), el momento en que se realiza su envío y verificando su correcta transmisión.

4.4.1.6 Fuente de alimentación dual TTI EX354D

La siguiente fuente de alimentación proporciona la tensión y corriente necesaria para alimentar las células de 60, 75 y 90°C.



Figura 4.32. Aspecto físico TTI EX354D

Esta fuente alimenta en tensión y corriente a los diodos conectados en serie:

Cuando todos están encendidos, lo hacen durante 30 segundos y se emplea una tensión de 35,4 porque hay 8 diodos conectados en serie y en cada uno caen 3,8 V, mas la tensión que cae en una resistencia de potencia ($8,2\Omega * 0,6\text{ A} \approx 5\text{ V}$) que se utiliza para que la fuente vea la misma carga que cuando conmute y se apaguen los últimos cuatro diodos durante 30 segundos, hace un total de 35,4 V.

Por otro lado para apagar los últimos 4 LEDs, el software y la alimentación se encargan de hacerlo durante 30 segundos. En ésta opción la tensión utilizada es de: 4 diodos * 3,8 V mas $8,2\Omega * 0,6$ de la resistencia mas 15,2 V de una resistencia adicional que equivale a la carga que ofrecen los LEDs en ciclos hace un total de 35,4 V.

4.4.2 Instrumentación Hardware puesto 2

En el puesto 2 se utiliza un programa en Labview para medir las curvas I-V, el espectro y fotos del encapsulado de cada diodo.

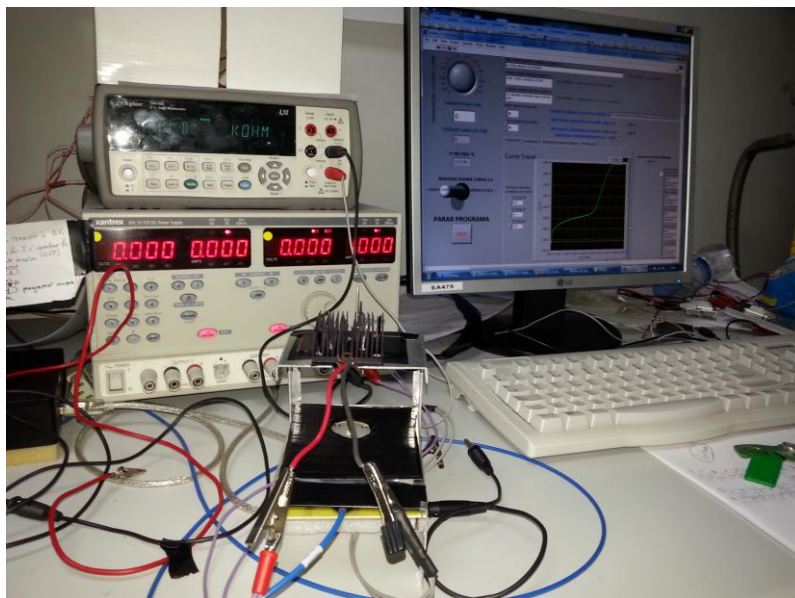


Figura 4.33. Puesto de trabajo dos para la medición de espectro y curvas I-V

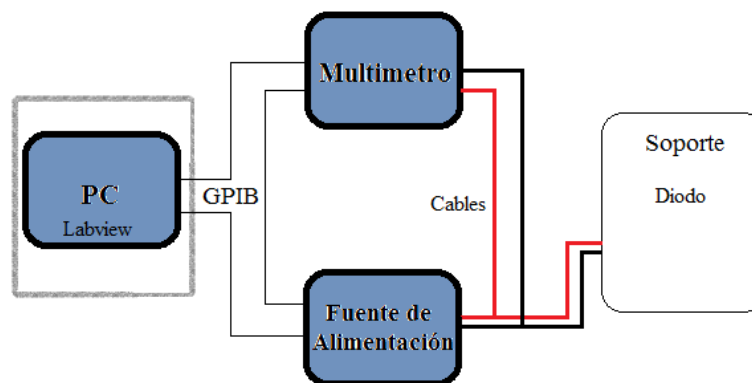


Figura 4.34. Diagrama de conexión de medición de curvas I-V

A continuación se describe la instrumentación empleada en el segundo puesto de trabajo:

4.4.2.1 Fuente de alimentación XANTREX XDL 35-5TP

Es una fuente de grandes prestaciones y gran versatilidad que incluye bajos niveles de rizado y ruido con una resolución de 1 mV para tensión y 0,1 mA de corriente, protección contra sobre tensión y sobrecorriente que se utilizó para hacer dos tipos de medidas:

- La primera consistió en medir la potencia óptica de cada LED programando el canal 1 a 3.45 V y 600mA durante 10 minutos.
- La segunda, realizaba la medición de las curvas I-V inyectando tensión en bornas del diodo. Se conecta al PC mediante un cable USB que permite programar la fuente.



Figura 4.35. Aspecto físico de la fuente

4.4.2.2 Espectrómetro Mightex SSE 1304 U



Figura 4.36. Aspecto físico del espectrómetro MIGHTEX SSE 1304 U

Esta herramienta permite medir el espectro y analizar las propiedades de la luz de cada uno de los diodos. Proporciona una alta resolución espectral ya que se requiere como requisito que tanto la longitud de onda como la amplitud sean muy estables. Su rango de funcionamiento es para longitudes de onda de 200-2400 nm.

El espectrómetro toma la entrada a través de un puerto de conector SMA y un cable de fibra se utiliza para transmitir la luz en el espectrómetro, después un DAC de 16 bits se utiliza para convertir la señal analógica de la matriz CCD en una corriente digital.

Se controla por USB 2.0 capaz de suministrar la alimentación necesaria y ponerlo en funcionamiento como se ve en la siguiente imagen:



Figura 4.37. Conexión del USB con el espectrómetro

En la siguiente imagen vemos la conexión del espectrómetro por cable de fibra óptica en un extremo y a una esfera integradora en el otro extremo:



Figura 4.38. Esfera integradora y cable de fibra óptica

La esfera integradora es capaz de reflejar el 95% de la luz que percibe evitando la mayor pérdida de energía posible.

4.4.2.3 Multímetro AGILENT 34410

Se trata de un multímetro digital, con el que se toman las curvas I-V, después de haber medido la potencia lumínica del espectro.



Figura 4.39. Aspecto físico del multímetro

Entre sus propiedades destacan su alta precisión, velocidad y rendimiento, permitiendo tomar 10.000 / segundo y enviarlas a un PC.

También permite hacer medidas a 2 y 4 hilos de resistencia, temperaturas, capacidades, frecuencias, periodos, continuidad y diodos.

4.4.2.4 Cámara MotiCAM 2000

Para ver con detalle la degradación del chip y el encapsulado de cada diodo, se toman distintas fotografías adaptando una cámara a la lente del microscopio. Junto con el software y los drivers de la cámara se realizan capturas de pantalla.



Figura 4.40. Aspecto físico de la cámara y el adaptador de microscopio

Las propiedades más importantes de la cámara son:

- Cámara CMOS de 1/2".
- 2.0 Mega píxeles (1600x1280) con salida PC USB 2.0.
- Con lentes CCD de 16 mm.
- Adaptadores oculares de 28 mm, 30 mm, 34 mm y 35 mm.
- Adaptador B&S (para uso en cualquier tubo ocular).
- Rejilla de Calibración.
- Tarjeta PCI USB 2.0 PCI incluido.
- Software MoticImages Plus 2.0.

La siguiente imagen muestra el microscopio con la cámara adaptada. Las imágenes del encapsulado y chip de los diodos se hacen una vez concluidas las mediciones de las curvas I-V y potencia lumínica.



Figura 4.41. Cámara adaptada en el microscopio

4.4.2.5 Ordenadores (PCs)

Se utilizaron dos ordenadores diferentes, uno para cada puesto de trabajo.

El del puesto uno utiliza el software de Labview para hacer funcionar los diodos dentro de los hornos mientras que el del puesto dos también utiliza Labview pero para medir las curvas I-V y el espectro de cada LED.



Figura 4.42. PC utilizado en el puesto uno



Figura 4.43. PC utilizado en el puesto dos

4.4.3 Software

Para la realización de este proyecto se han utilizado tres Software diferentes:

4.4.3.1 Labview

Se utilizan dos programas: “Gesusuario” y “LZ1 00UV00” del proyecto fin de carrera de Jorge Ramírez y Jorge García-Mochales (mencionado anteriormente) para poder ajustar el entorno de trabajo a nuestros requisitos del proyecto.

Para poder adaptar los LEDs UV se configuraron los siguientes parámetros del programa “Gesusuario”:

4.4.3.1.1 Gesusuario

La configuración del programa se realiza mediante las siguientes pestañas:

- CONTROL

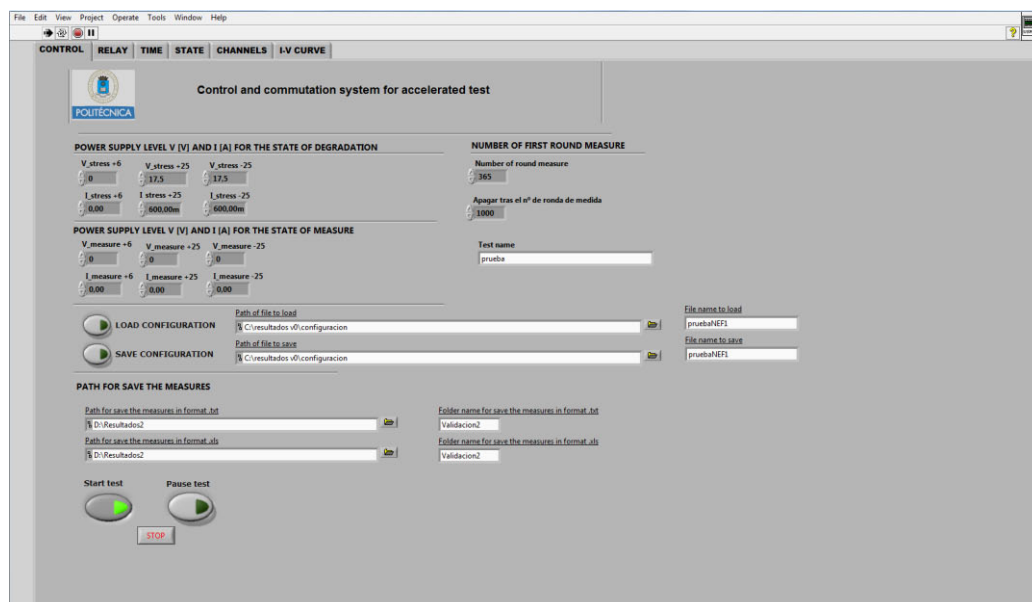


Figura 4. 44. Pestaña Control del programa Gesusuario.

Permite al usuario configurar los niveles de tensión y limitación de corriente de la fuente de alimentación, el número de rondas del ensayo, y salvar la configuración en un archivo para no tener que ajustar los valores a la hora de empezar el test.

Una vez configurados todos los parámetros pulsaremos el botón Start test para comenzar el ensayo. En caso de que algo no se realice correctamente, está la opción de pausar el test.

• RELAY

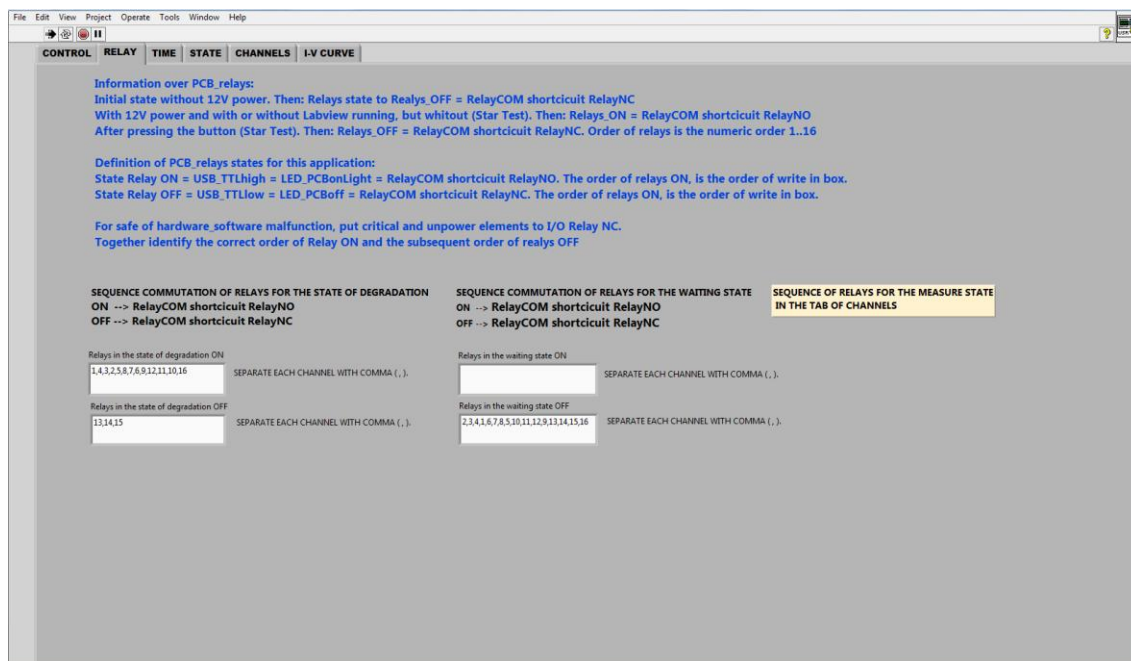


Figura 4.45. Pestaña Relay del programa Gesuuario.

Seleccionando la pestaña de “RELAY” accedemos a otro menú donde el usuario debe indicar los relés que quiere conmutar para cambiar de degradación a estado de espera o viceversa. Los relés están numerados del 1 al 16 y son los que tenemos en la tarjeta.

La utilización de los pines NC y COM significa: Normalmente Cerrado, cuando el relé no está alimentado (OFF) su salida está cerrada, es decir, circula corriente. Pero cuando le alimentamos (ON) su salida pasa a estar en circuito abierto sin circulación de corriente.

La utilización de los pines NO y COM significa: NO es normalmente abierto, cuando el relé no está alimentado (OFF), su salida está abierta, es decir no circula corriente, pero cuando le alimentamos (ON) por su salida circula corriente.

- TIME

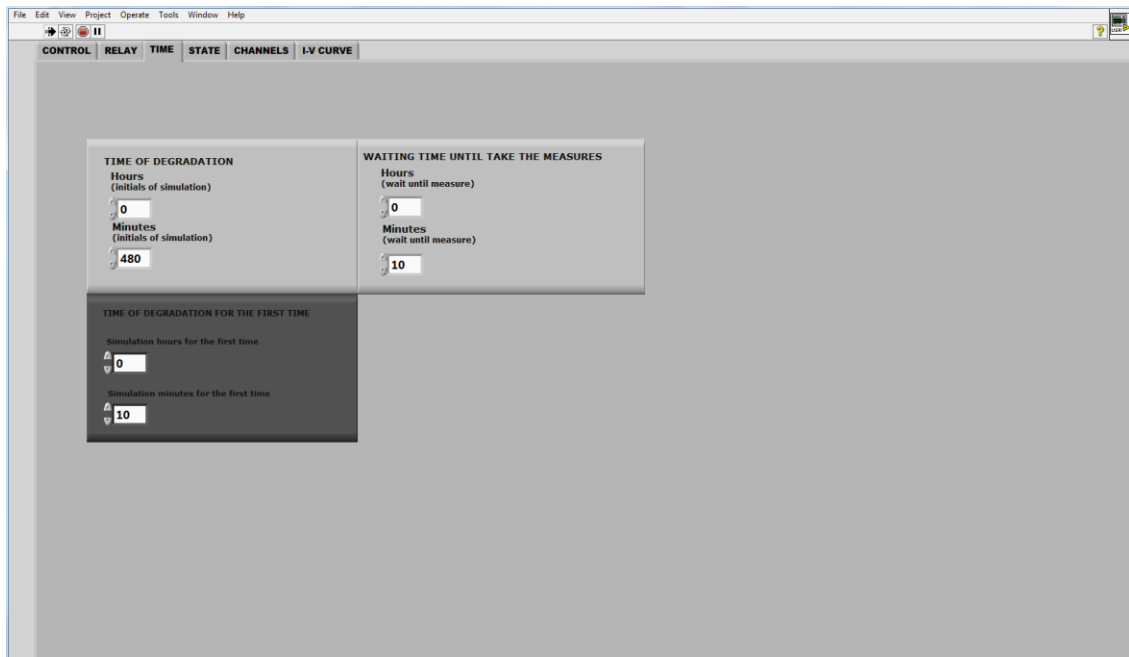


Figura 4.46. Pestaña Time del programa Gesusuuario.

En la pestaña Time, ajustamos la duración del ensayo tanto en horas como minutos. La primera opción es la de tiempo de degradación, que sirve para configurar el tiempo durante el cual a los diodos se les inyecta una corriente de de 600mA. Tras haber concluido la degradación, seleccionamos el tiempo de espera que permanecen en reposo (sin inyección de corriente) para hacer la medida mas estable. La opción de tiempo de degradación de la primera ronda solo se ejecuta la primera vez.

- STATE

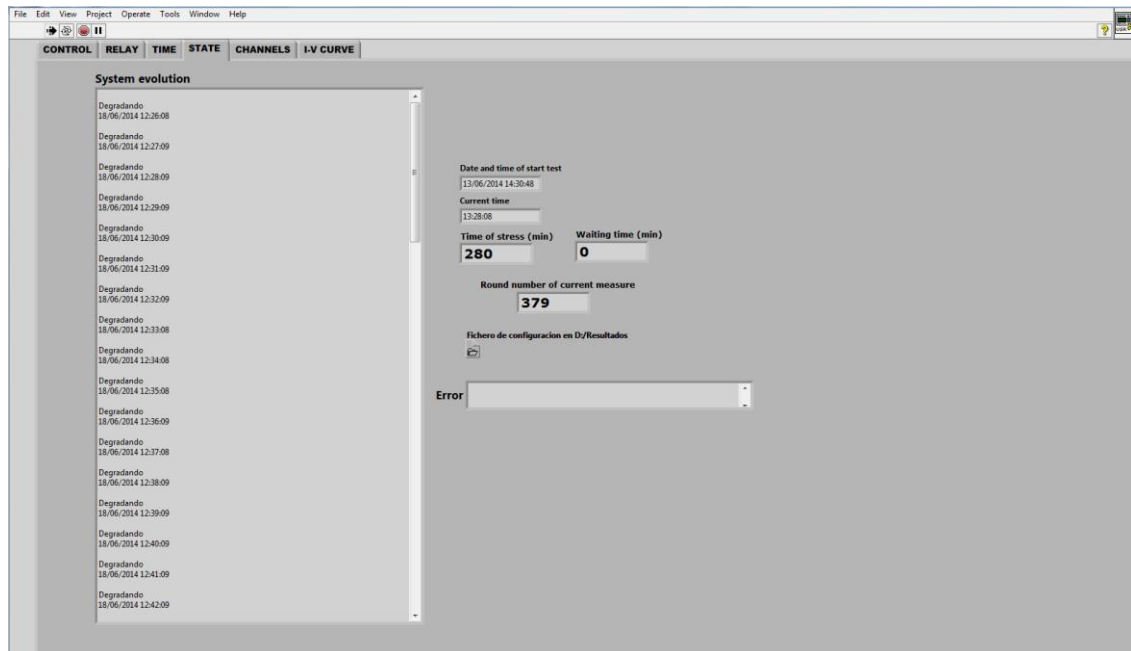


Figura 4.47. Pestaña State del programa Gesusuario.

State muestra las condiciones en tiempo real del ensayo, hay una ventana de la evolución del ensayo que nos dice el estado en el que se encuentra. También tenemos noción de la ronda actual de medida y las que quedan para finalizar el ensayo. En caso de haber un error durante el ensayo se notifica en su respectiva ventana.

- CHANNELS

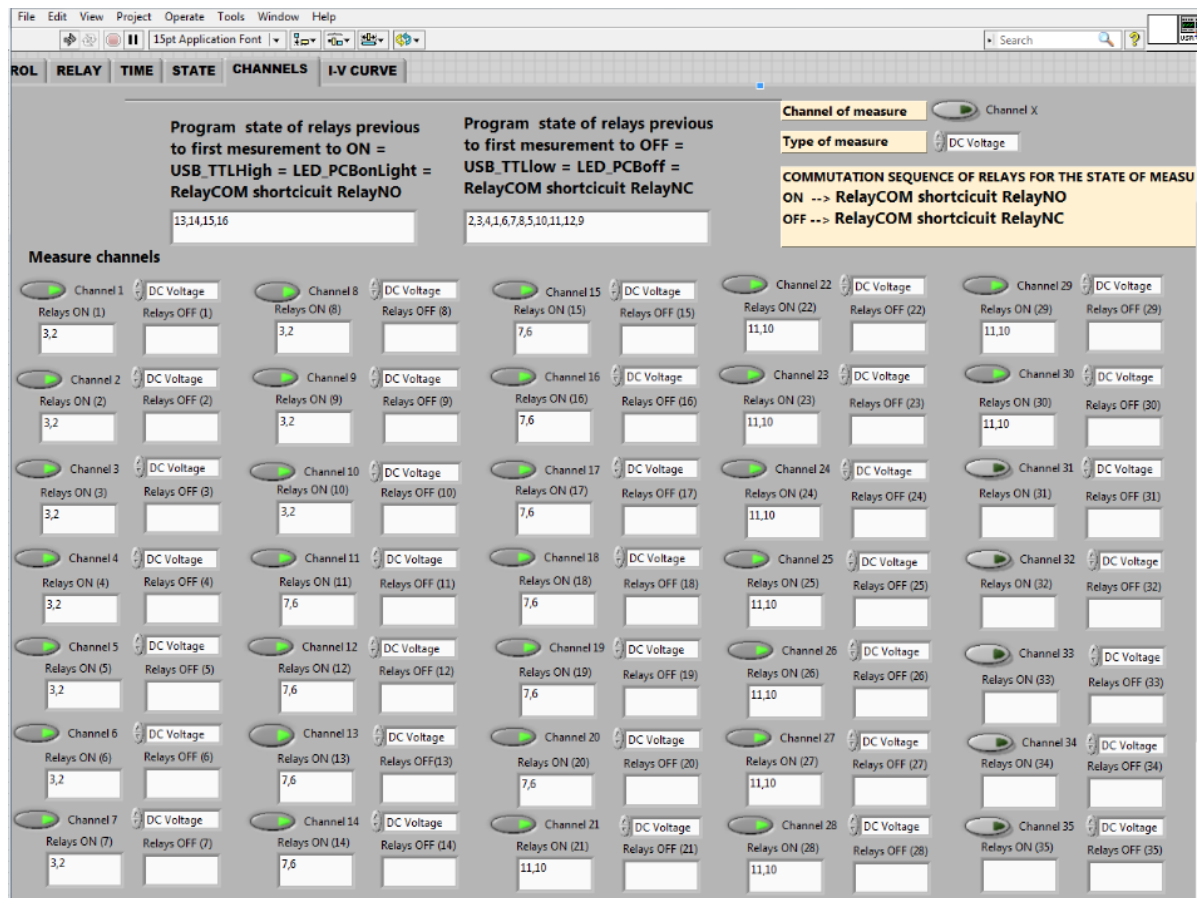


Figura 4.48. Pestaña Channels del programa Gesusuario.

En la pestaña Channels, el usuario puede seleccionar entre los 42 canales de medida de los que dispone la tarjeta de relés 7700 si los necesita ON u OFF, en caso de necesitar el canal puede elegir el tipo de medida que desea realizar, medida de tensión DC, medida de corriente DC, resistencia, resistencia a 4 hilos, continuidad y temperatura.

- I-V CURVE

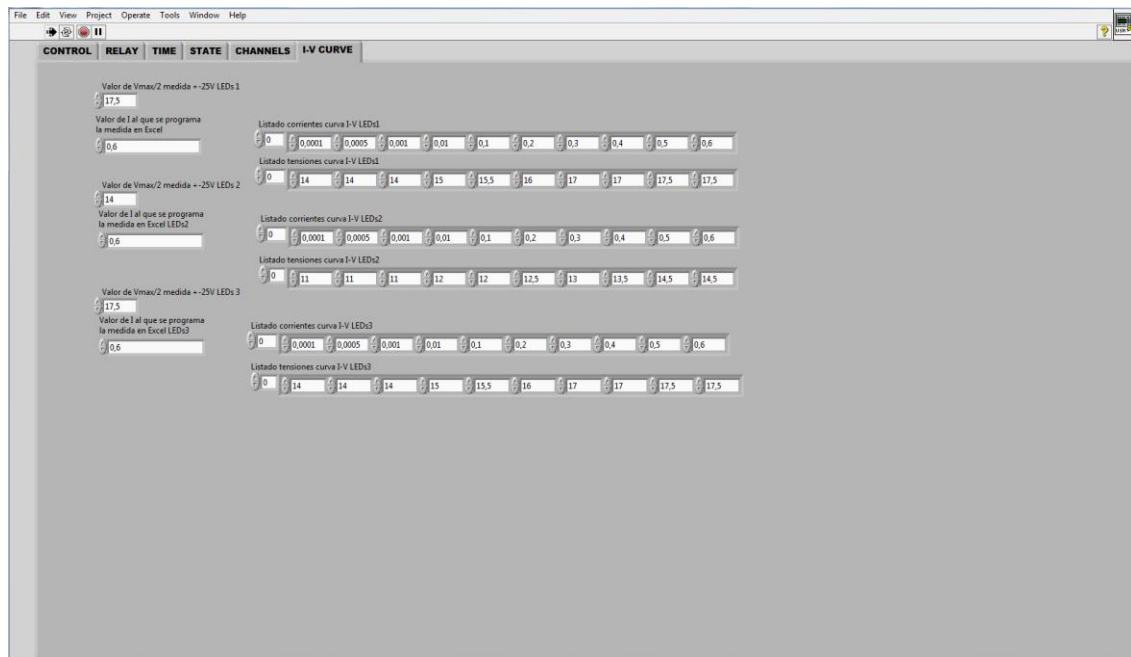


Figura 4.49. Pestaña I-V curves del programa Gesusuario.

Para la medición de curvas IV realmente usaremos otro programa que nos permite dibujar la curva con más puntos y así obtener una mejor información del estado de degradación del LED. Cuando finaliza el estado de reposo, empieza la medición de las curvas aplicando incrementos de corriente.

4.4.3.1.2 LZ1 00UV00

El siguiente programa realiza las curvas IV de cada LED de manera mas precisa con más puntos de información:

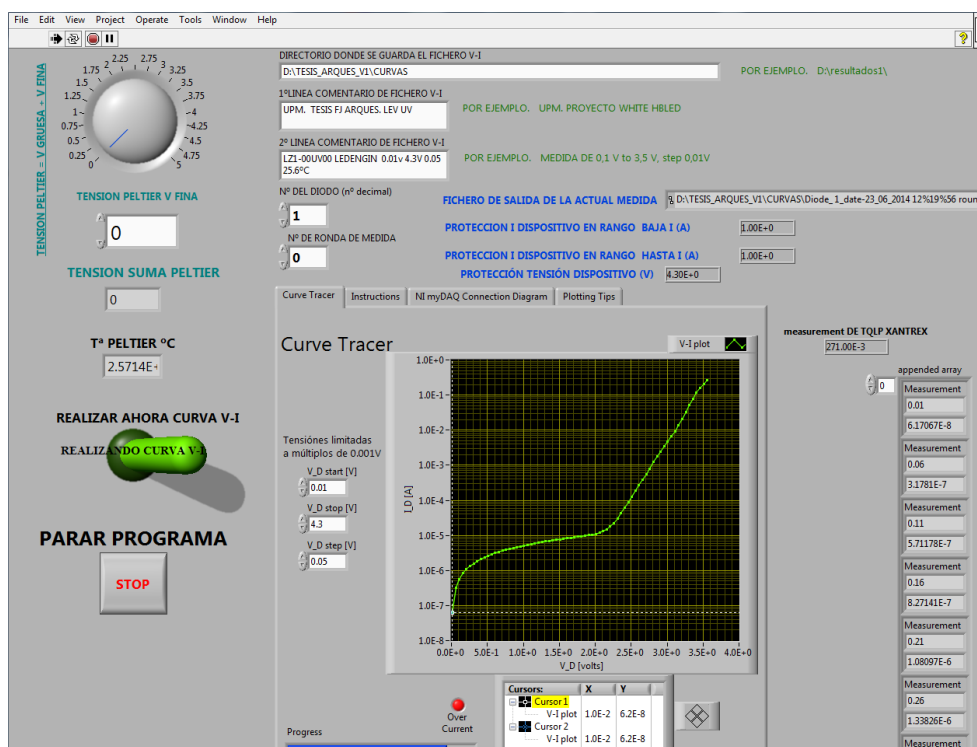


Figura 4.50. Programa de medición de las curvas I-V

Este programa aplica tensión en bornas del LED a medir, desde 10mV aplicando incrementos de tensión de 50 mV hasta llegar a los 4,3V de protección del dispositivo. También se limita la corriente a 1A como medida de protección. En un fichero se almacenan los valores de la corriente que se obtienen para cada incremento de tensión para poder dibujar la gráfica en Excel posteriormente.

4.4.3.2 MightexSpectrometer

Éste programa se utiliza para las hacer capturas del espectro de emisión del diodo LED UV. Para ello se configuran los parámetros que aparecen en la imagen de la misma manera:

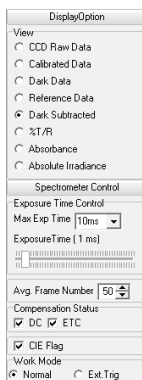


Figura 4.51. Configuración de los parámetros

- Dark subtracted para poder visualizar el espectro. Su eje de abscisas o eje x, la longitud de onda y el eje de ordenadas o eje y, el número de cuentas.
- El tiempo máximo de exposición elegido es de 10ms con pasos de 1ms. Éste tiempo se elige en función de la saturación de cada diodo a la hora de ver representado su espectro. Interesa ver su máximo.
- Con la opción Average Frame Number conseguimos que el número de imágenes por segundo se reduzca para ver el espectro prácticamente estable y sin movimientos.
- El resto de opciones se utilizan por defecto, no influyen en las medidas.

Una vez han sido configurados estos parámetros se procede a hacer una captura:



- La primera opción realiza una captura simple del espectro.
- La segunda opción permite varias capturas simultáneas. Esta fue la opción elegida.
- La tercera opción muestra el espectro en tiempo real.

Podemos ver un ejemplo en la siguiente figura:

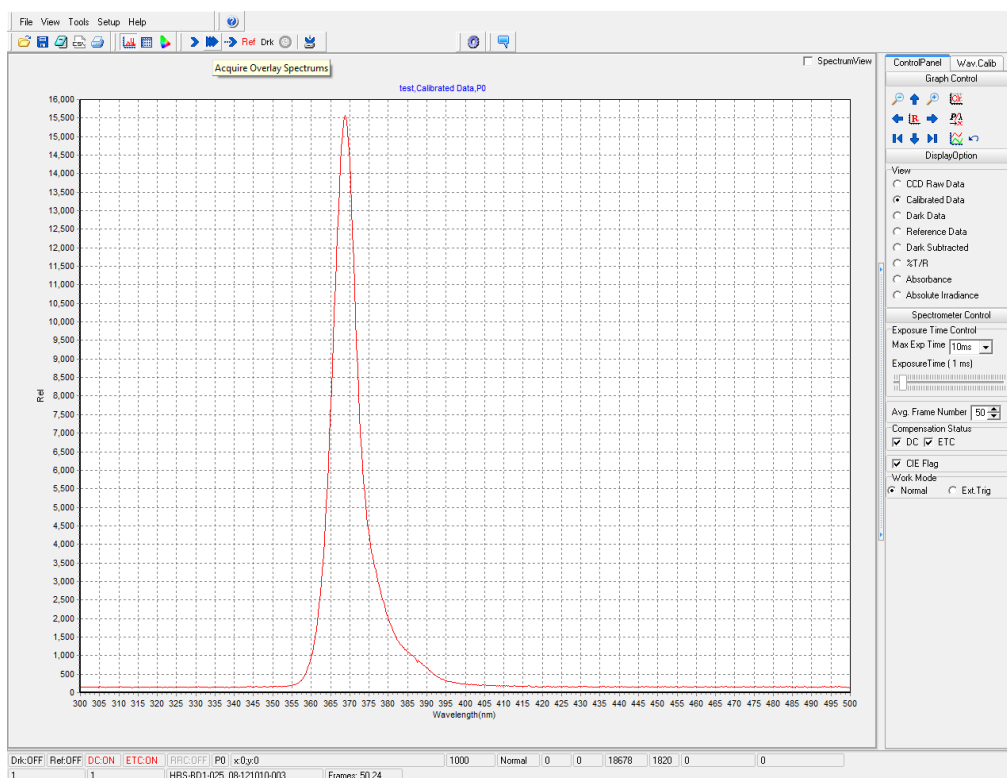


Figura 4.52. Espectro de una captura en movimiento de un LED UV. Se representa longitud de onda (eje x) por número de cuentas(eje y)

Otra opción que permite el programa es poder ver la situación de la longitud del diodo en dos estándares cromáticos:

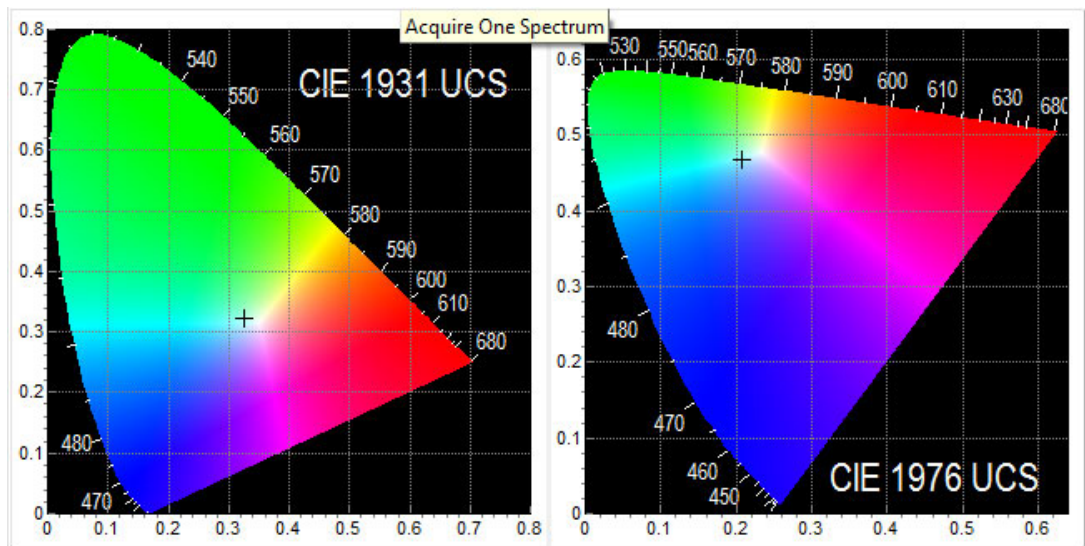
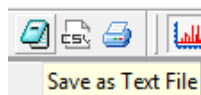


Figura 4.53. Posición de longitud de onda según los estándares cromáticos

Una vez capturado el espectro, se guarda el archivo en un bloc de notas para poder exportarlo en excell donde se calcula el promedio del número de cuentas de cada captura. Esto se explicará en el capítulo de resultados.



4.4.3.3 MoticImages Plus 2.0

Este programa permite tomar fotografías de los encapsulados de los diodos para ver el estado de degradación. Junto con la cámara Moticam2000 y el microscopio se encargan de hacer las capturas posibles.

En la siguiente imagen podemos ver la configuración:

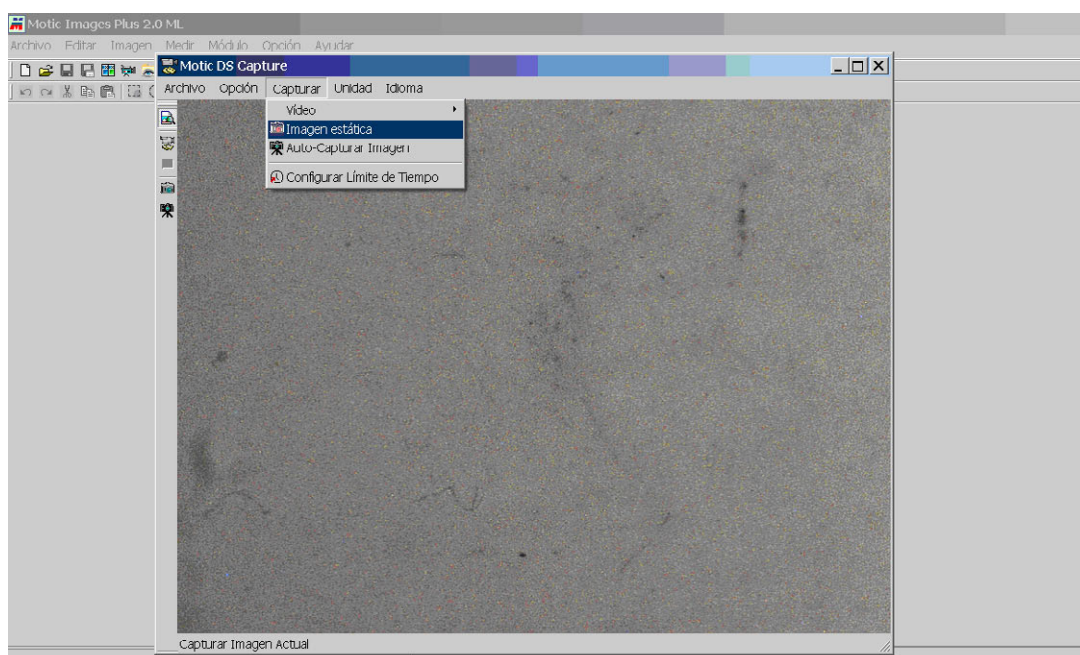


Figura 4.54. Modo de captura de imagen estática

Así quedaría una foto del encapsulado de un diodo LED UV tras un aumento de 16x del microscopio:

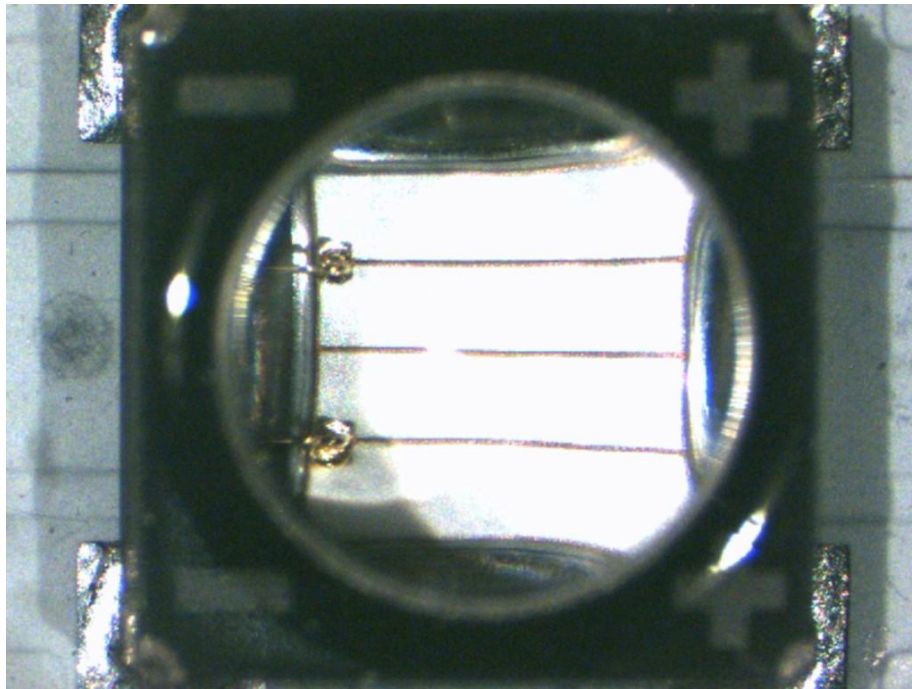


Figura 4.55. Imagen del chip interior del diodo tipo II

4.5 CONCLUSIONES CAPITULO 4

Este capítulo analiza los ensayos acelerados realizados.

- Primero se hace una descripción de la metodología utilizada durante cada sesión de trabajo para que las medidas no sufran ningún tipo de cambio.
- Después se explica cómo fue la caracterización de los LEDs UV para obtener los mejores resultados durante las pruebas y posteriormente ser introducidos en los hornos de ensayo.
- Para poder entender cómo se realizaron los ensayos, se hace una referencia a la instrumentación empleada que parte de un proyecto fin de carrera anterior al que se le introdujeron pequeñas modificaciones para poder adaptarlos a nuestros objetivos.
- Por último se describe el software utilizado que permitió hacer las mediciones dentro y fuera de los hornos, que servirá para analizar los resultados y elaborar conclusiones.

CAPITULO 5

RESULTADOS

5 Resultados

El bloque de resultados se centra en el estudio de los aspectos más importantes del ensayo ya que son los que nos permiten elaborar las conclusiones necesarias en el último tema que veremos más adelante.

A lo largo del ensayo se han caracterizado los dispositivos mediante las siguientes técnicas:

- Curva I-V del dispositivo a temperatura controlada con el objetivo de evaluar la degradación del chip a lo largo del ensayo.
- Espectrometría de los LEDs con el objetivo de evaluar las prestaciones de los LEDs a lo largo del ensayo.
- Microscopía óptica de los LEDs con el objetivo de evaluar la degradación del encapsulado a lo largo del ensayo.

A continuación vamos a describir los principales resultados obtenidos.

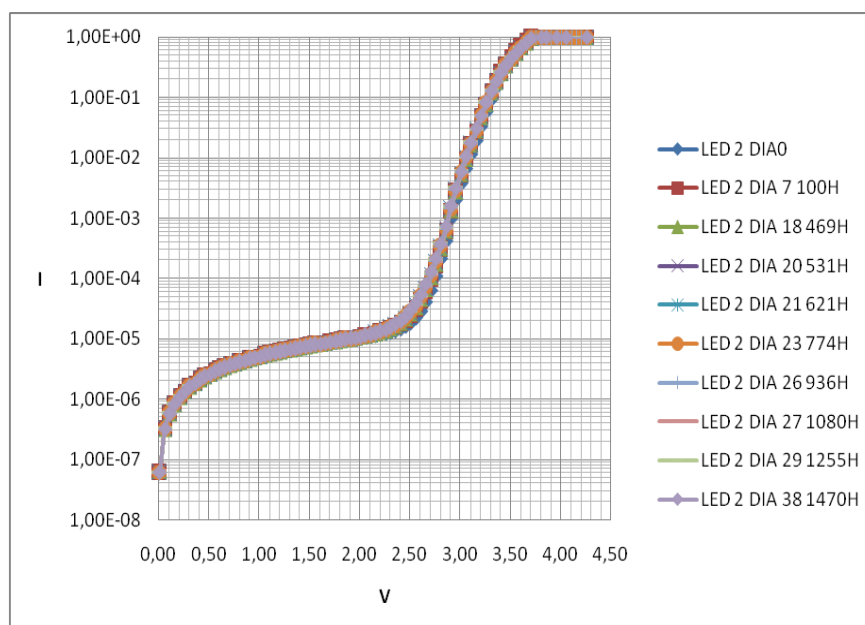
5.1 Curvas I-V

Las curvas I-V han sido obtenidas con la instrumentación y el programa Labview descrito en la sección anterior.

El programa Labview guarda en un archivo de texto los datos con los valores de tensión y corriente para después exportarlos al Excel y elaborar las gráficas:

A continuación mostraremos para cada uno de los tres ensayos la evolución de la curva I-V de un LED de cada tipo a ambas condiciones de trabajo.

- Diodo Tipo I a 60°C e inyección de corriente continua.



- Diodo Tipo I a 60°C e inyección de ciclos de corriente

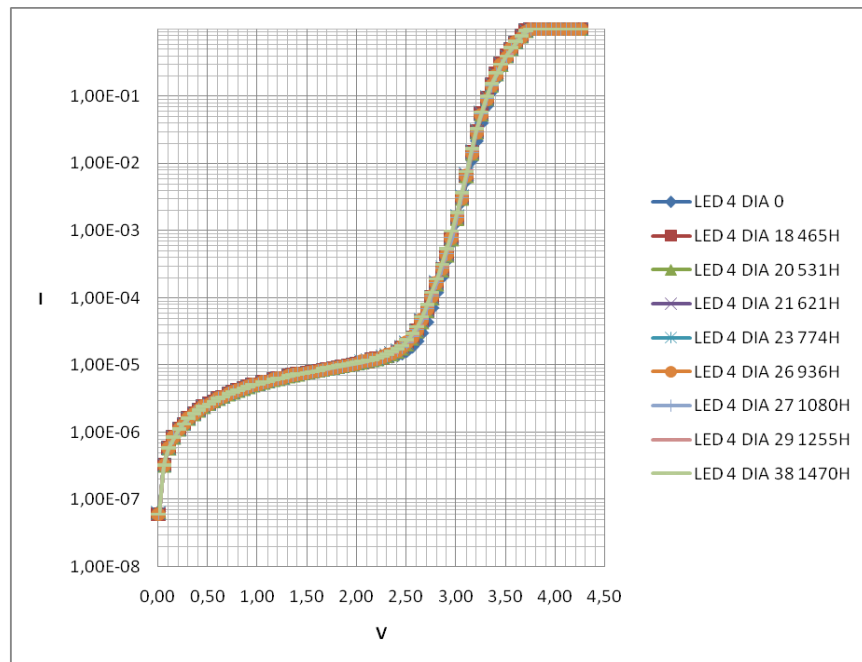


Figura 5.2. Evolución de la curva IV del diodo 4

Se observa que a bajas temperaturas (60°C) la degradación de las curvas I-V de los LEDs de tipo I, tanto para ciclos de inyección de ciclos de corriente como continua es inapreciable.

- Diodo Tipo I a 75°C e inyección de corriente continua.

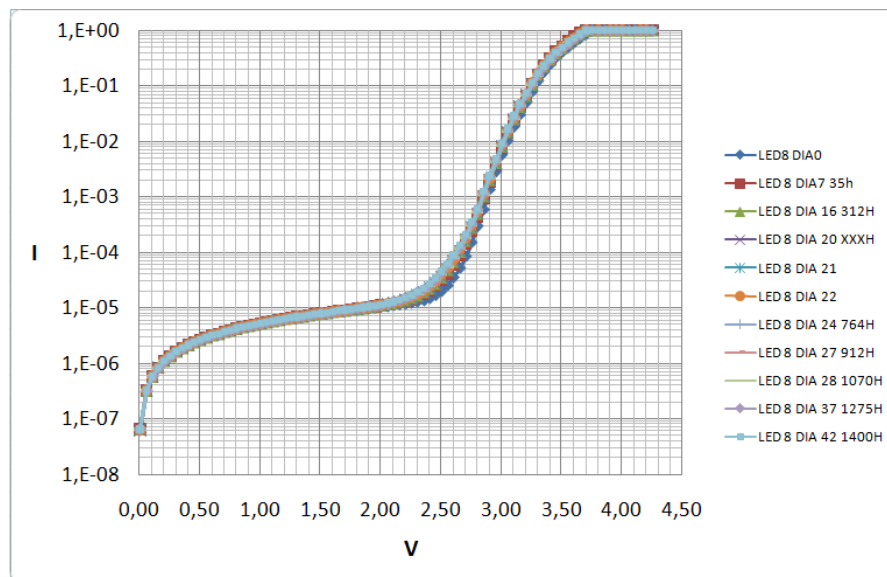
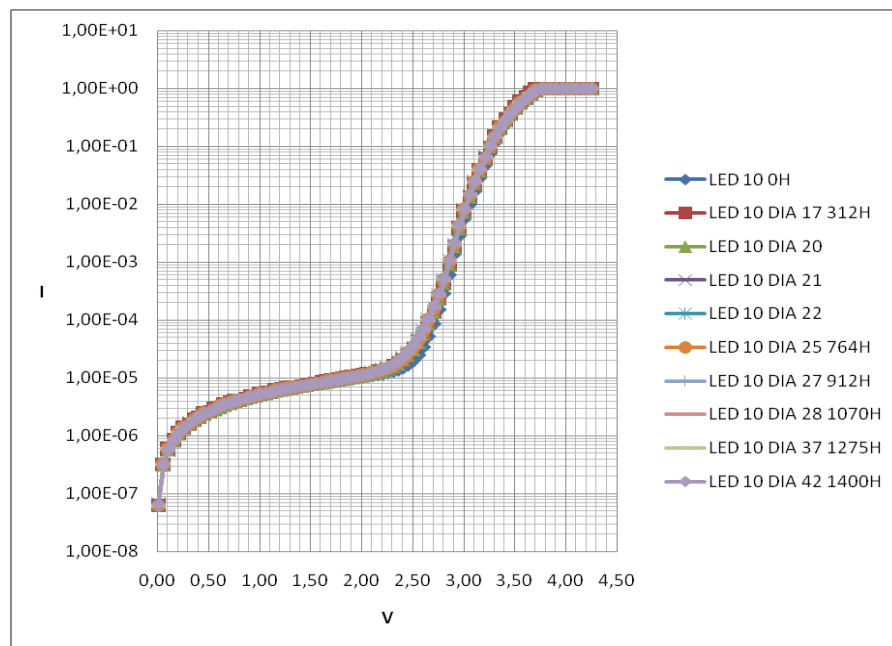


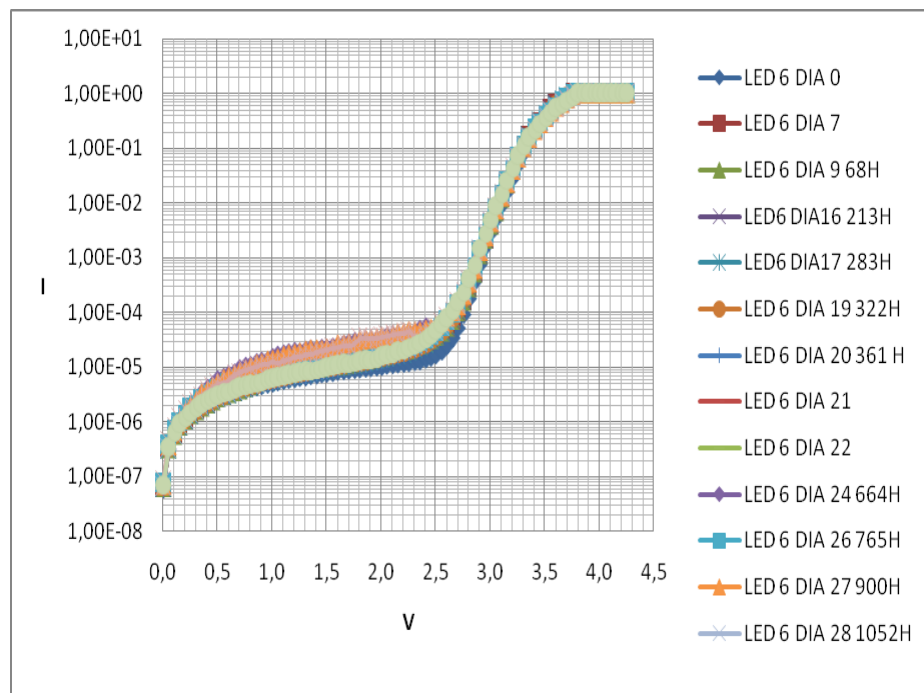
Figura 5.3. Evolución de la curva IV del diodo 8

- Diodo Tipo I a 75°C e inyección de ciclos de corriente



Se observa que a temperaturas medias (75°C) la degradación de las curvas I-V de los LEDs del tipo I, tanto para ciclos de inyección de corriente alterna como continua es inapreciable.

- Diodo Tipo I a 90°C e inyección de corriente continua.



- Diodo Tipo I a 90°C e inyección de ciclos de corriente

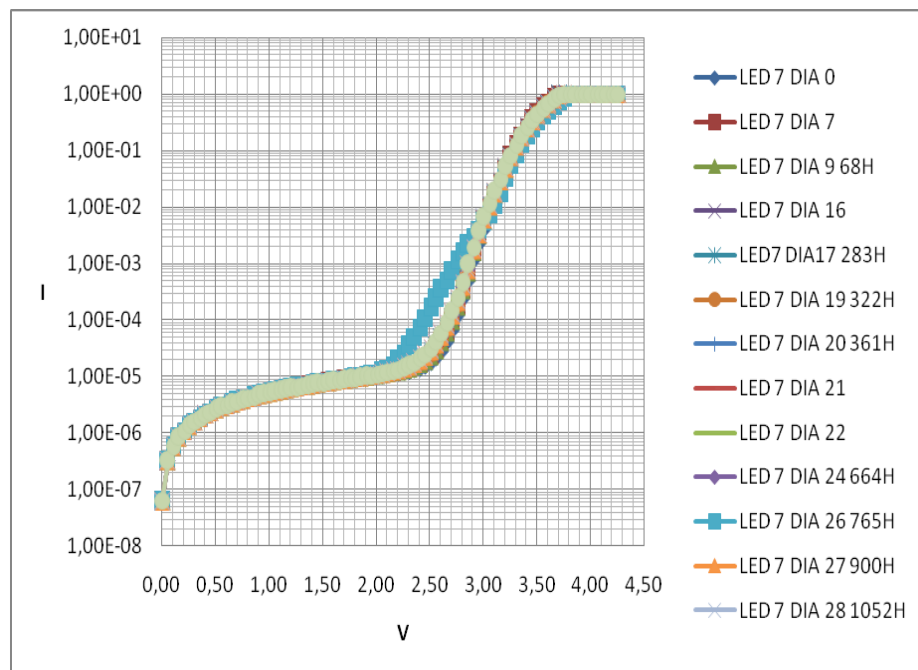


Figura 5.6. Evolución de la curva IV del diodo 7

A temperaturas altas (90°C) se observa que en el modo de trabajo continuo a bajas corrientes se produce una degradación, mientras que con los ciclos de corriente alterna la degradación de la curva I-V es menor. Esta degradación de la curva I-V es debida a una disminución de la resistencia en paralelo que hace que la corriente circule por ella en vez de por el diodo.

- Diodo Tipo II a 60°C e inyección de corriente continua.

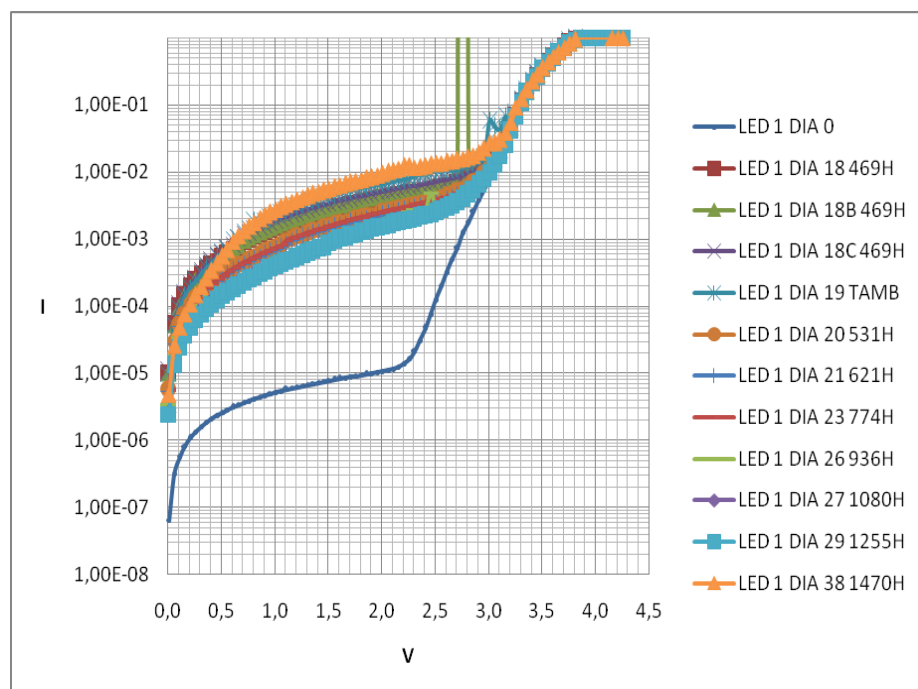


Figura 5.7. Evolución de la curva IV del diodo 1

- Diodo Tipo II a 60°C e inyección de ciclos de corriente

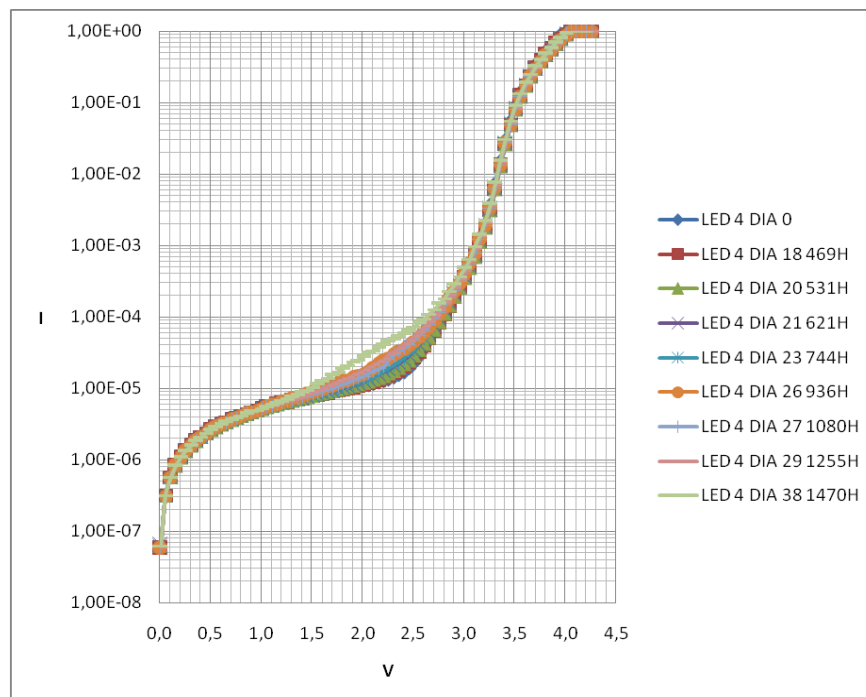


Figura 5.8. Evolución de la curva IV del diodo 4

En los diodos de tipo II se observa también pero de forma mucho más importante que la resistencia en paralelo influye en la degradación de la curva I-V a bajas corrientes, una vez el LED entra en polarización directa, el comportamiento de la curva es normal. Esto tiene mayor impacto en ciclos continuos de corriente.

- Diodo Tipo II a 75°C e inyección de corriente continua.

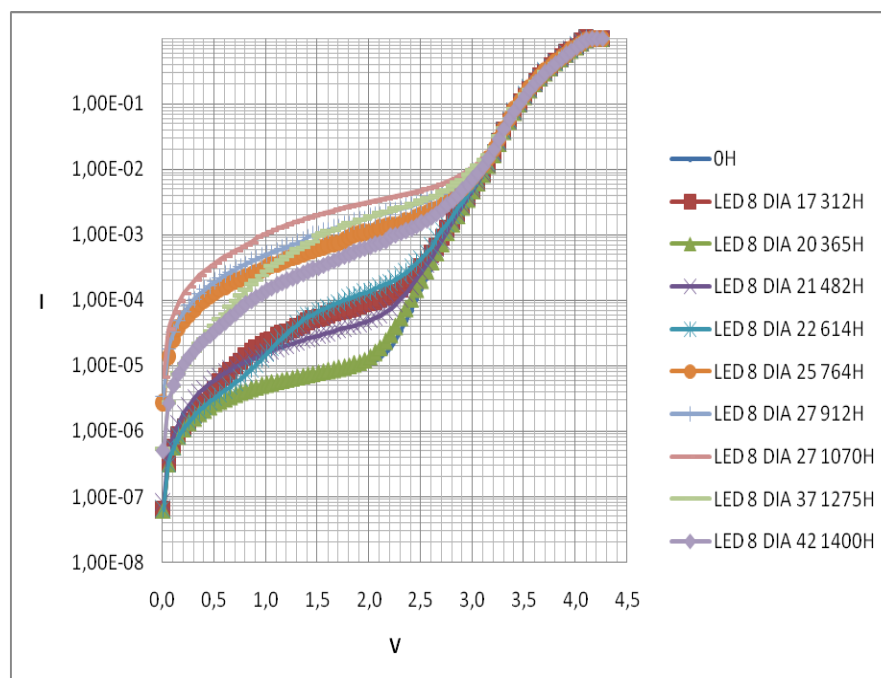


Figura 5.9. Evolución de la curva IV del diodo 8

- Diodo Tipo II a 75°C e inyección de ciclos de corriente

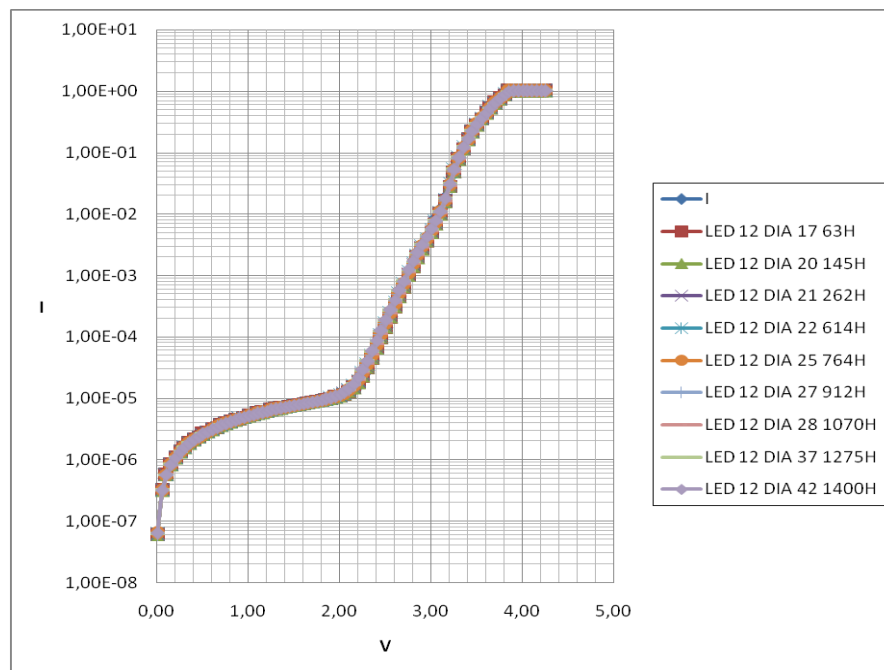


Figura 5.10. Evolución de la curva IV del diodo 12

A temperaturas medias (75°C) se observa que la degradación de la curva I-V es más pronunciada que a 60°C y también es mayor en el LED con inyección continua que con inyección ciclada. La degradación de la curva I-V también es atribuible a una disminución de la resistencia en paralelo.

- Diodo Tipo II a 90°C e inyección de corriente continua.

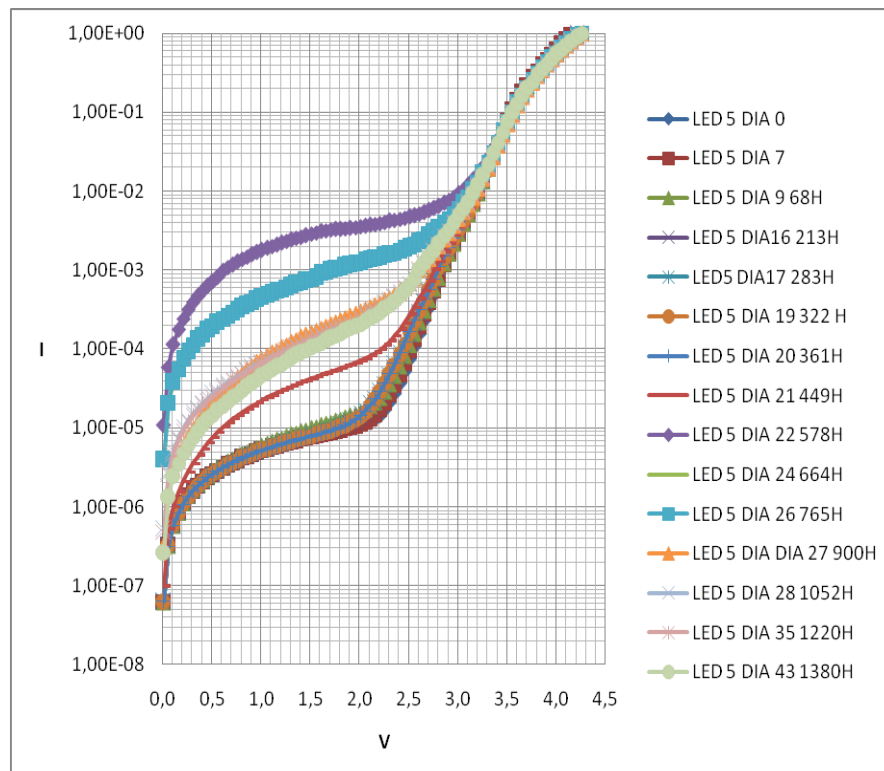


Figura 5.11. Evolución de la curva IV del diodo 5

- Diodo Tipo II a 90°C e inyección de ciclos de corriente

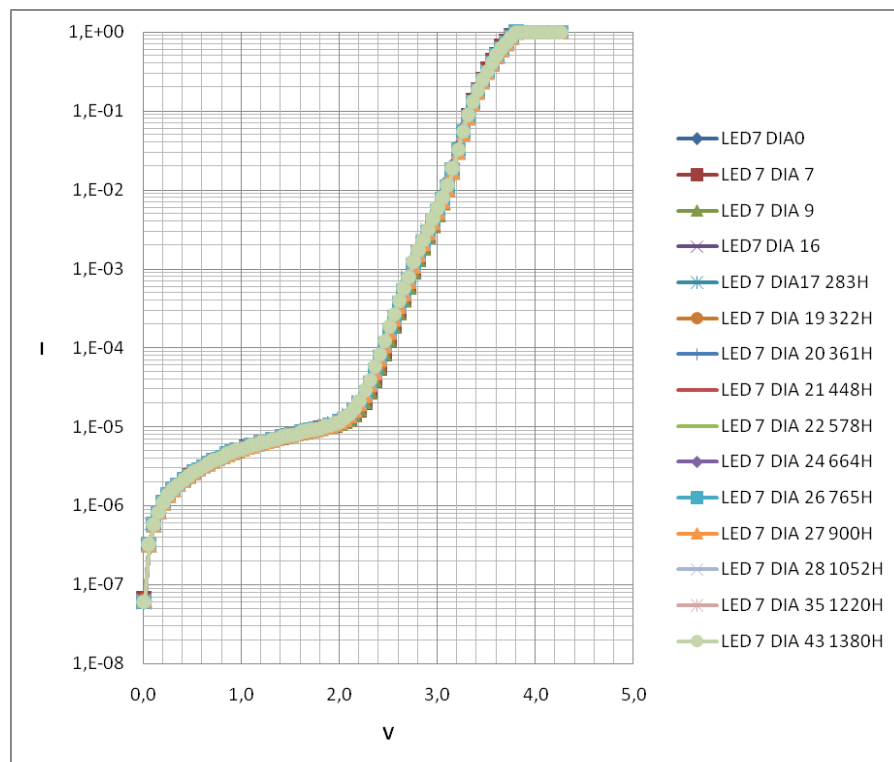


Figura 5.12. Evolución de la curva IV del diodo 7

Finalmente, para altas temperaturas (90°C) observamos el mismo efecto que en los dos casos anteriores. En ciclos de inyección de corriente continua hay una mayor degradación que en los alternos.

Como conclusiones a la degradación de la curva I-V a lo largo del ensayo podemos destacar:

- La degradación de la curva I-V de los LEDs es atribuida a una disminución de la resistencia en paralelo que hace que la corriente circule por ella en vez de por el diodo.
- La degradación de la curva I-V no va acompañada por una pérdida de potencia luminosa a 600mA debido a que la degradación de la curva I-V se produce a corrientes menores.
- La degradación de la curva I-V aumenta con la temperatura.
- La degradación de la curva I-V es mayor en los LEDs tipo II que en los LEDs tipo 1.
- En todos los ensayos y en ambos tipos de LEDs la curva I-V de los LEDs que trabajan en continua se degrada más que los LEDs que trabajan en ciclos de corriente.

5.2 Espectrometría de los LEDs

Se han realizado espectrometrías de cada uno de los 22 LEDs en diferentes instantes de tiempo del ensayo con el objetivo de analizar la degradación de la potencia luminosa de los LED.

En las siguientes figuras se observa cómo evoluciona en el espectro del LED con el tiempo:

En las siguientes tablas mostramos la evolución a lo largo del ensayo de la anchura de pico y de la longitud de onda del pico. Para calcular la anchura del pico utilizaremos FWHM (Full Width at Half Maximum o Anchura a Media Altura) que se calcula a que viene dada por la diferencia entre los dos valores extremos de la longitud de onda en los que la en número de cuentas es igual a la mitad de su valor máximo. El desplazamiento del pico se calcula como la diferencia de la longitud de onda donde se encuentra el máximo antes y después del ensayo:

- Diodo 3 del tipo I a 60°C e inyección de corriente continua:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
18950,547	12538,129	15227,662
368,625 nm	369,410 nm	368,867 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3103)=9235,118	x1(3099)=6355,344	x1(3101)=7539,846
x2=9123,665	x2=6455,866	x2=7363,048
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3103)=373,855 nm	x1(3103)=374,901 nm	x1(3101)=374,378 nm
x2=364,440 nm	x2=365,225 nm	x2=364,702 nm
9,415	9,676	9,676

Tabla 5.1

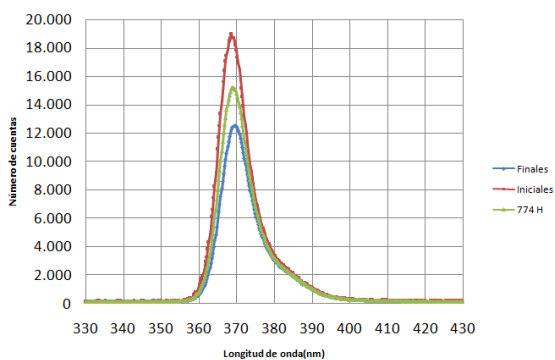


Figura 5.13. Evolución espectral, LED 3

- Diodo 4 del tipo I a 60°C e inyección de ciclos de corriente:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
16706,275	12986,488	14478,021
368,363 nm	368,363 nm	368,102 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3104)=8406,674	x1(3103)=6421,424	x1(3104)=7322,521
x2=8111,245	x2=6194,955	x2=7130,209
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3104)=373,594 nm	x1(3103)=373,855 nm	x1(3104)=373,594 nm
x2=364,179 nm	x2=364,440 nm	x2=364,179 nm
9,415	9,415	9,415

Tabla 5.2

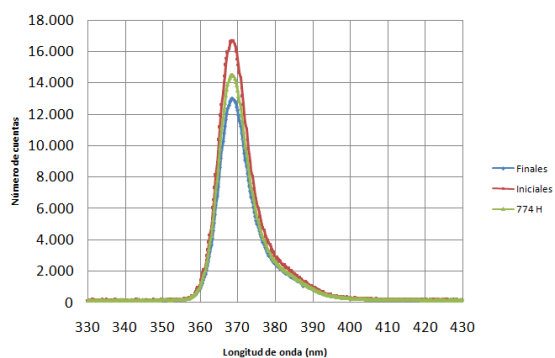


Figura 5.14. Evolución espectral, LED 4

- Diodo 2 del tipo II a 60°C e inyección de corriente continua:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
14382,775	14387,454	16089,549
369,148 nm	369,671 nm	369,41 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3105)=6991,279	x1(3104)=7383,972	x1(3106)=8005,120
x2=6906,627	x2=7383,848	x2=7978,401
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3105)=373,332 nm	x1(3104)=373,594 nm	x1(3106)=373,071 nm
x2=365,486 nm	x2=366,010 nm	x2=365,486 nm
7,846	7,584	7,585

Tabla 5.3

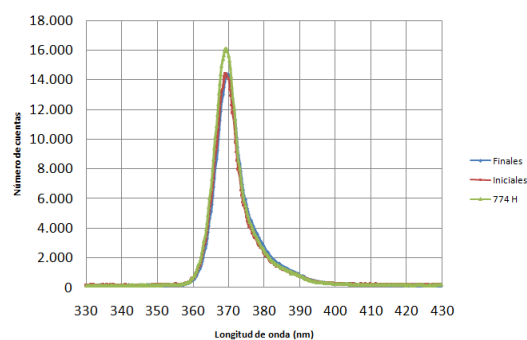


Figura 5.15. Evolución espectral, LED 2

- Diodo 4 del tipo II a 60°C e inyección de ciclos de corriente:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.774H
15874,936	16009,709	16921,670
369,410 nm	369,671 nm	369,41 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3105)=8109,080	x1(3105)=8054,165	x1(3106)=8540,282
x2=8076,511	x2=8079,252	x2=8251,998
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3105)=373,332 nm	x1(3105)=373,332 nm	x1(3106)=373,071 nm
x2=365,748 nm	x2=365,748 nm	x2=365,486 nm
7,584	7,584	7,585

Tabla 5.4

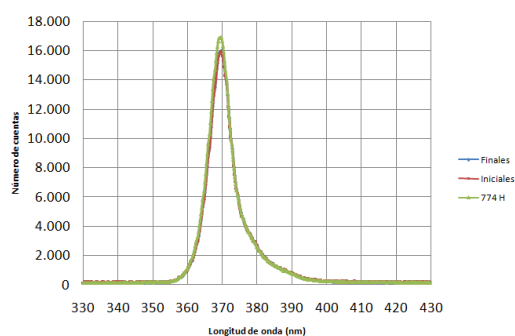


Figura 5.16. Evolución espectral, LED 4

- Diodo 8 del tipo I a 75°C e inyección de corriente continua:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
17540,488	8595,696	11206,346
368,625 nm	369,410 nm	369,148 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3104)=8683,547	x1(3099)=4287,26	x1(3101)=5702,528
x2=9020,635	x2=4365,382	x2=5532,414
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3104)=373,594 nm	x1(3099)=374,901 nm	x1(3101)=374,378 nm
x2=364,702 nm	x2=365,22 nm	x2=364,963 nm
8,892	8,871	9,415

Tabla 5.5

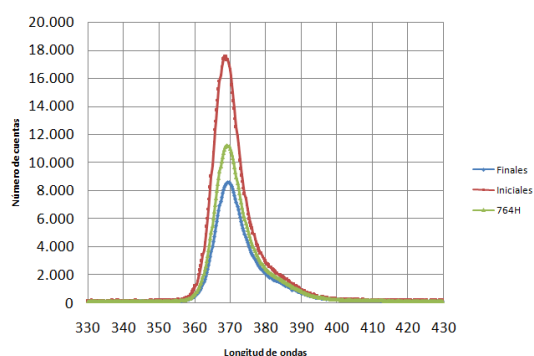


Figura 5.17. Evolución espectral, LED 8

- Diodo 10 del tipo I a 75°C e inyección de ciclos de corriente:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
17642,992	11919,597	15189,786
368,363 nm	368,887 nm	368,625 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3105)=9006,532	x1(3103)=6148,821	x1(3105)=7850,708
x2=8610,734	x2=5902,789	x2=7428,437
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3105)=373,332 nm	x1(3103)=373,855 nm	x1(3105)=373,332 nm
x2=364,440 nm	x2=364,702 nm	x2=364,440 nm
8,892	9,153	8,892

Tabla 5.6

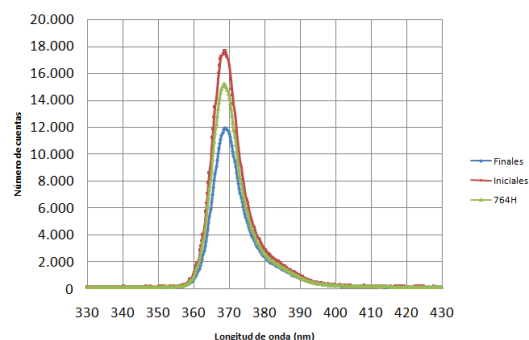


Figura 5.18. Evolución espectral, LED 10

- Diodo 8 del tipo II a 75°C e inyección de corriente continua:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
15646,552	13966,380	15189,786
369,671 nm	370,194 nm	368,625 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3104)=7802,496	x1(3101)=7130,581	x1(3104)=7447,646
x2=3134	x2=6928,101	x2=7428,437
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3104)=373,594 nm	x1(3101)=374,378 nm	x1(3104)=373,594 nm
x2=365,748 nm	x2=366,271 nm	x2=364,440 nm
7,846	8,107	9,154

Tabla 5.7

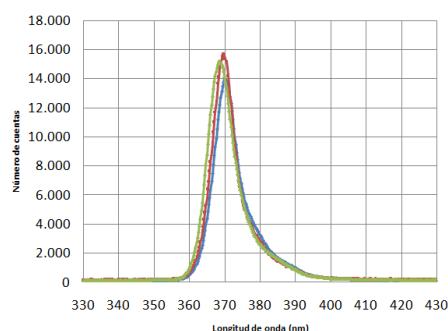


Figura 5.19. Evolución espectral, LED 8

- Diodo 11 del tipo II a 75°C e inyección de ciclos de corriente:

Max.Iniciales	Max.Finales	Max.764H
17967,384	14692,898	15987,286
369,671 nm	369,633 nm	369,671 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3103)=8721,547	x1(3103)=7209,798	x1(3103)=7979,329
x2=7233,424	x2=7301,802	x2=7207,177
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3103)=373,855 nm	x1(3103)=373,855 nm	x1(3103)=373,855 nm
x2=366,010 nm	x2=366,01 nm	x2=366,010 nm
7,845	7,845	7,845

Tabla 5.8

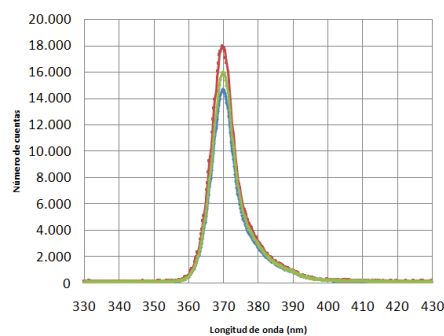


Figura 5.20. Evolución espectral, LED 11

- Diodo 11 del tipo I a 90°C e inyección de corriente continua:

Max.Inicio	Max.Finales	Max.664H
19689,38	6429,56	10100,61
3123	3119	3121
368,3634826	369,41 nm	368,89 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3105)=9875,20	x1(3098)=3259,4	x1(3101)=5052,26
x2=9863,69	x2=3287,15	x2=5256,49
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3105)=373,07 nm	x1(3098)=374,9 nm	x1(3101)=374,12 nm
x2=364,44 nm	x2=365,22 nm	x2=364,96 nm
8,63	9,68	7,58

Tabla 5.9

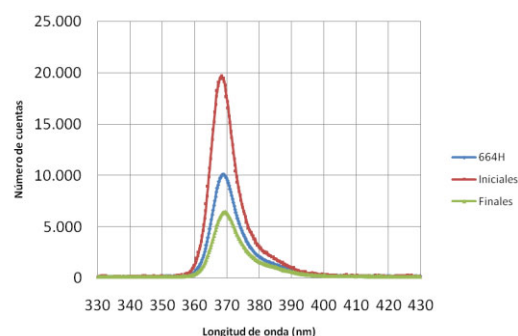


Figura 5.21. Evolución espectral, LED 11

- Diodo 7 del tipo I a 90°C e inyección de ciclos de corriente:

Maximo inic.	Maximo fin.	MAX. 664H
20976,24879	11430,96307	15467,63
3123	3118	3119
368,102 nm	369,41 nm	369,148 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3104)=10343,14	x1(3098)=5802,3344	x1(3100)=7767,226
x2=10012,92	x2=5856,2	x2=7472,776
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3104)=373,071 nm	x1(3098)=374,64 nm	x1(3100)=374,117 nm
x2=363,917 nm	x2=365,225 nm	x2=364,702 nm
9,093	9,415	9,525

Tabla 5.10

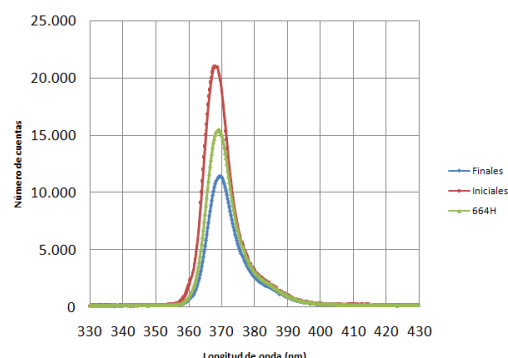


Figura 5.22. Evolución espectral, LED 7

- Diodo 6 del tipo II a 90°C e inyección de corriente continua:

Max.Inicio	Max.Finales	Max.664H
18769,13	14461,37	16477,76
3122	3120	3120
368,63	369,15 nm	368,89 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3108)=9293,87	x1(3104)=7092	x1(3105)=8031,76
x2=9769,5	x2=3134	x2=8055,26
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3108)=372,29 nm	x1(3104)=373,33 nm	x1(3105)=373,07 nm
x2=364,96 nm	x2=365,49	x2=365,22 nm
7,33	7,81	7,85

Tabla 5.11

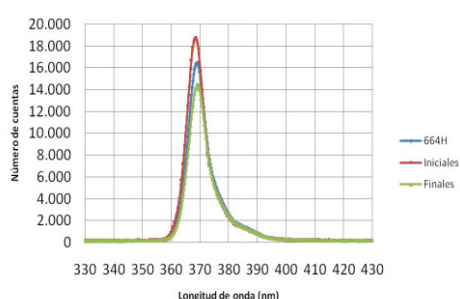


Figura 5.23. Evolución espectral, LED 5

- Diodo 7 del tipo II a 90°C e inyección de ciclos de corriente:

Max.Inicio	Max.Finales	Max.664H
19079,29	18444,01	19286,92
3119	3118	3119
369,15 nm	369,41 nm	369,15 nm
Mitad inicio	Mitad fin	Mitad 664H
50%	50%	50%
x1(3104)=9738,757	x1(3103)=9355,732	x1(3104)=9664,036
x2=9252,303	x2=9290,108	x2=9547,918
FWHM	FWHM	FWHM
x1(3104)=373,07 nm	x1(3103)=373,33 nm	x1(3104)=373,07 nm
x2=365,49 nm	x2=365,75 nm	x2=365,49 nm
7,58	7,58	7,58

Tabla 5.12

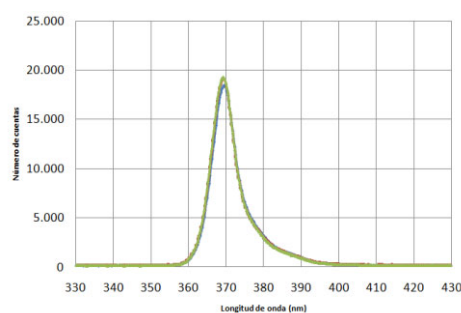


Figura 5.24. Evolución espectral, LED 7

De los espectros realizados se observa que los picos de potencia no se ensanchan (FWHM prácticamente constante ni se desplazan por lo que tomaremos el valor de pico como referencia para la potencia luminosa. Todas las curvas que vienen a continuación están realizadas con el valor pico de potencia.

- Espectrometría de ensayos acelerados a 60°C sobre diodos del tipo I:

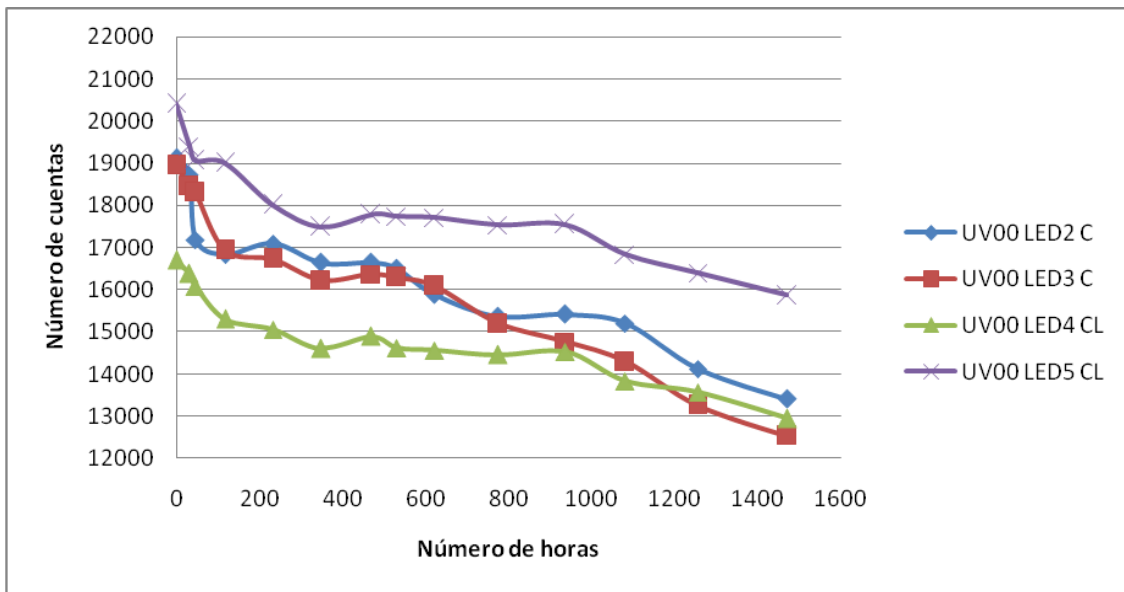


Figura 5.25. Evolución del número de cuentas a 60°C

- Espectrometría de ensayos acelerados a 75°C sobre diodos del tipo I:

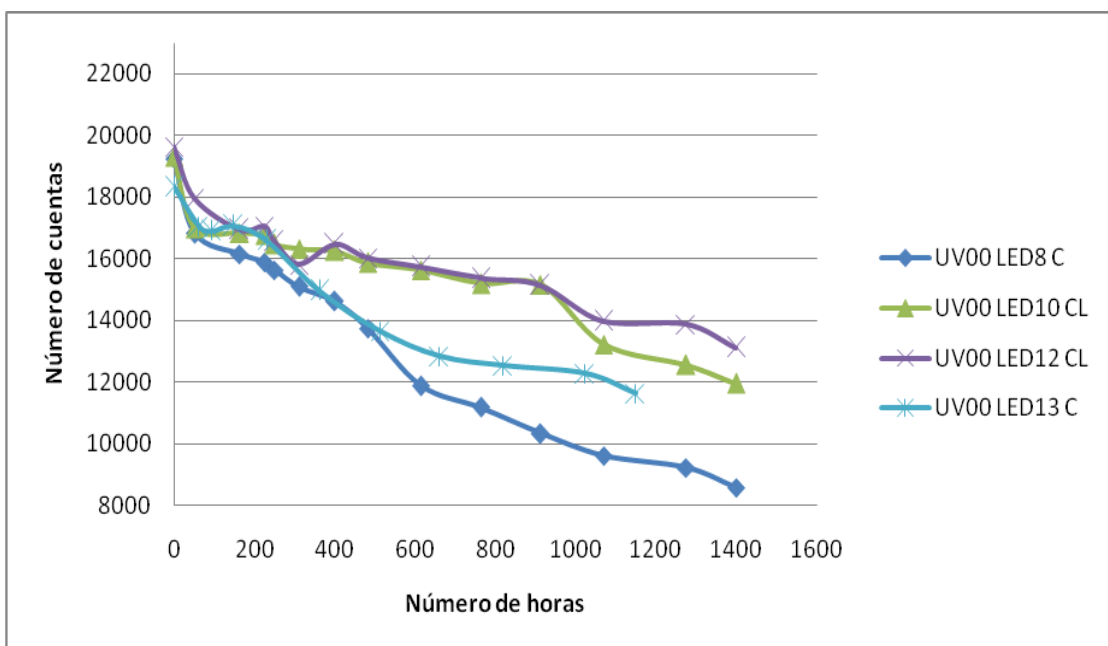


Figura 5.26. Evolución del número de cuentas a 75°C

- Espectrometría de ensayos acelerados a 90°C sobre diodos del tipo I:

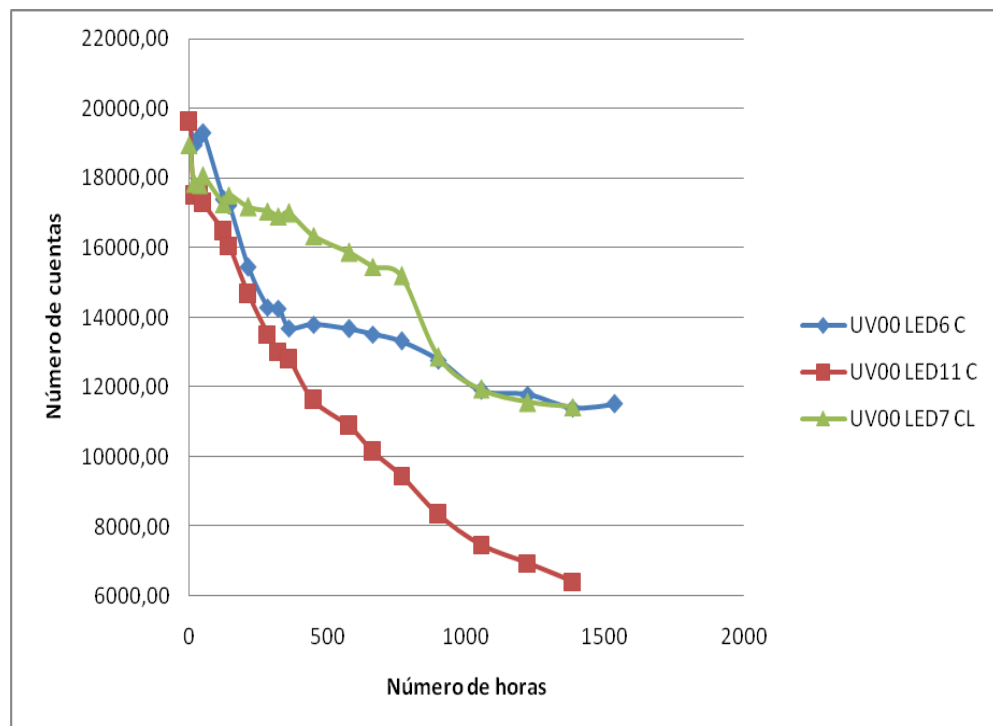


Figura 5.27. Evolución del número de cuentas a 90°C

Como vemos en las tres figuras anteriores se aprecia claramente que los ciclos de corriente continua afectan a la luminosidad del diodo cayendo en mayor proporción el número de cuentas que con los ciclos alternos de corriente.

La siguiente figura relaciona la media de potencia relativa de luminosidad con respecto a la primera medida:

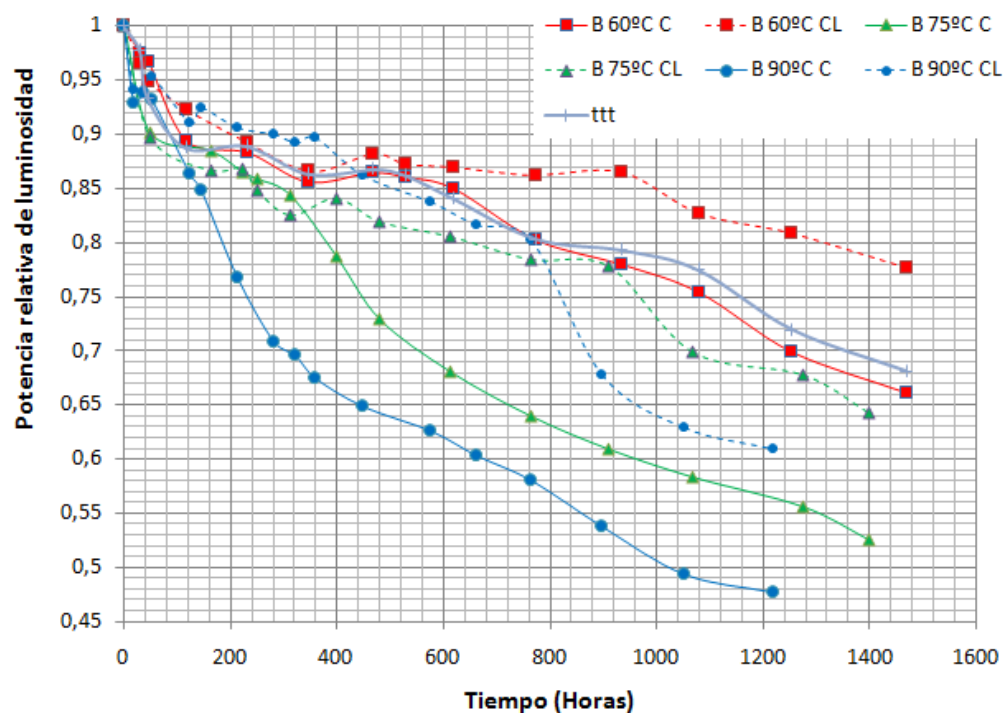


Figura 5.28. Media de potencia relativa

Los valores que están por debajo del 70% de su potencia inicial se les consideran fallo por degradación.

- Espectrometría de ensayos acelerados a 60°C sobre diodos del tipo II:

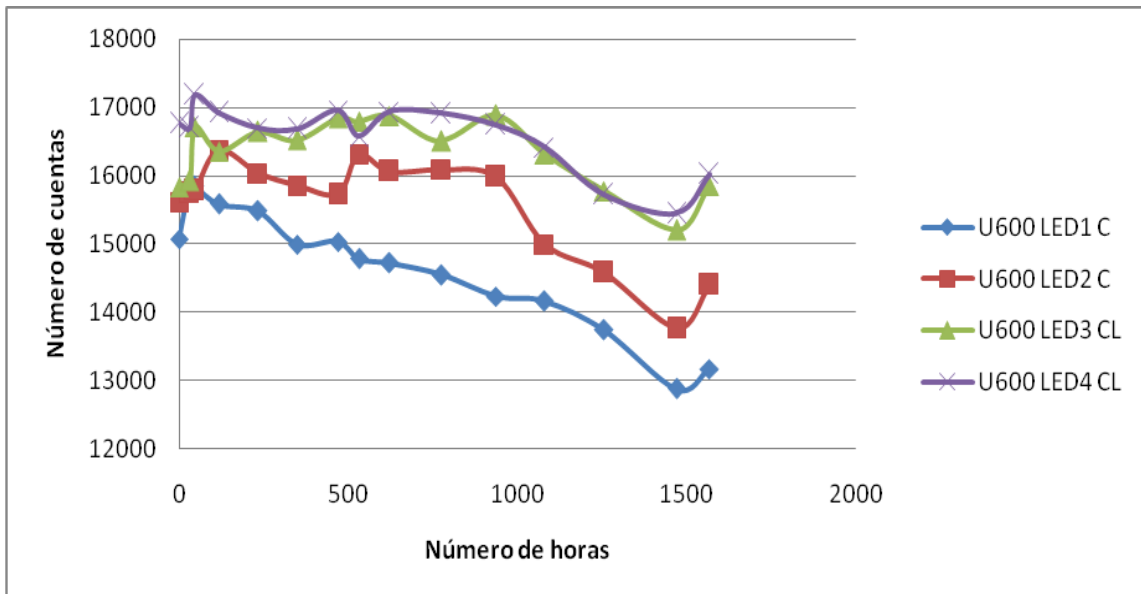


Figura 5.29. Evolución del número de cuentas a 60°C

- Espectrometría de ensayos acelerados a 75°C sobre diodos del tipo II:

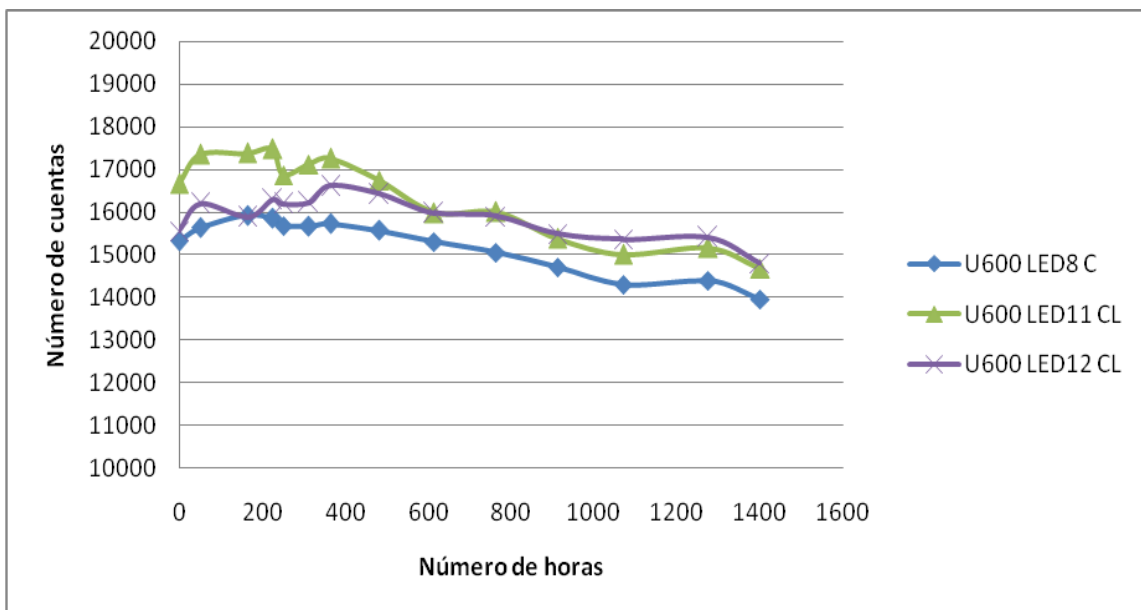


Figura 5.30. Evolución del número de cuentas a 75°C

- Espectrometría de ensayos acelerados a 90°C sobre diodos del tipo II:

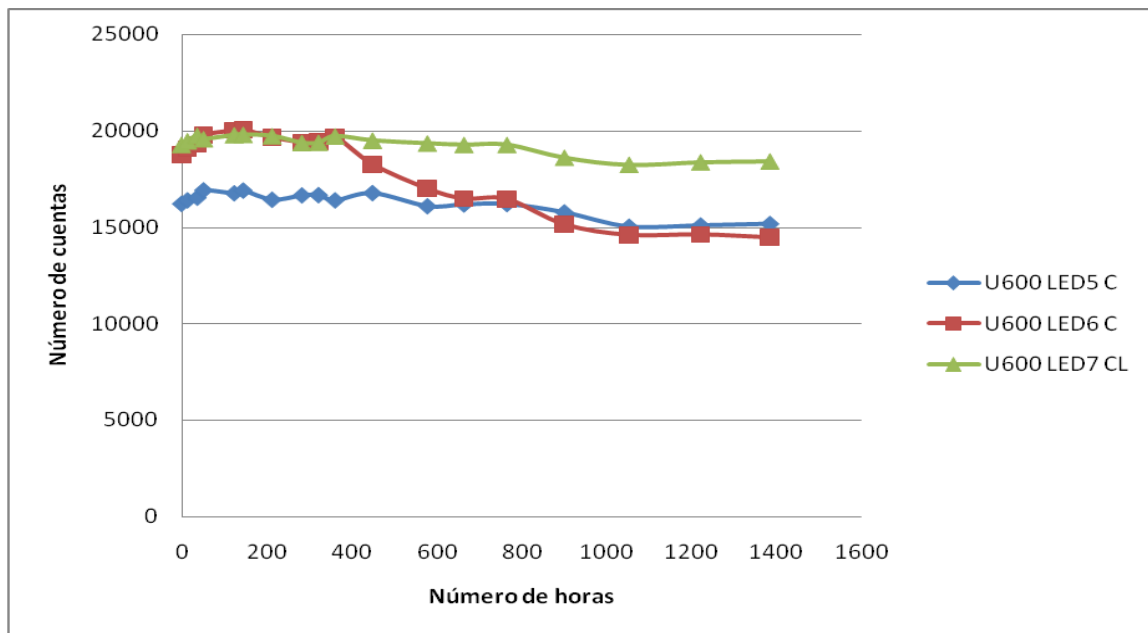


Figura 5.31. Evolución del número de cuentas a 90°C

En las tres gráficas anteriores se observa que en los diodos de tipo II, independientemente de las temperaturas, los LEDs sufren una menor degradación de la luminosidad, siendo prácticamente constante el número de cuentas con respecto al paso de las horas.

La siguiente figura relaciona la media de potencia relativa de luminosidad con respecto a la primera medida:

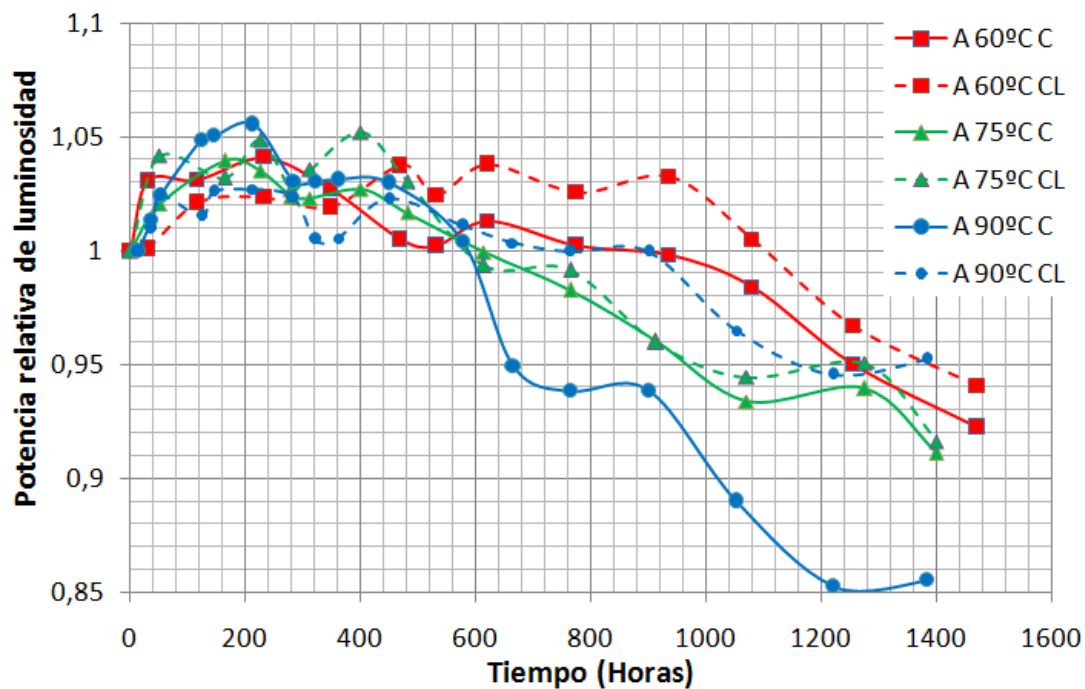


Figura 5.32. Media de potencia relativa

En la figura 5.32 se observa que al inicio del ensayo los diodos experimentan una mejora de la luminosidad, pero tras horas de ensayo, comienzan a caer los LEDs que son inyectados con ciclos continuos de corriente que alternos. Aun así podemos decir que los diodos del tipo II aguantaron mejor que los del tipo I sin llegar a caer por debajo del 85% de su potencia inicial, considerando que los diodos no fallaron por degradación.

En la siguiente tabla mostramos la evolución a lo largo del ensayo de la anchura de pico y de la longitud de onda del pico:

Id. LED	Tipo	T (°C)	Ciclo o Continuo	Potencia (%)	Despl. Pico (nm)	Variación FWHM (nm)
3	I	60	Continuo	-34	0,785	0,261
4	I	60	Ciclo	-22	0	0
2	II	60	Continuo	0	0,523	-0,262
4	II	60	Ciclo	1	0,261	0
8	I	75	Continuo	-51	-0,215	-0,021
10	I	75	Ciclo	-32	0,524	0,261
8	II	75	Continuo	-11	0,523	0,261
11	II	75	Ciclo	-8	-0,038	0
11	I	90	Continuo	-67	1,05	1,05
7	I	90	Ciclo	-46	1,308	0,322
6	II	90	Continuo	-23	0,52	0,48
7	II	90	Ciclo	3	0,26	0

Tabla 5.13. Evolución de las características espectrales de los diodos. El valor de la columna Potencia es $100 \times (P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}}) / P_{\text{inicial}}$. Las columnas Despl. Pico y FWHM han sido definidos con anterioridad.

Las principales conclusiones de las tablas son las siguientes:

- A lo largo del ensayo no se observa ensanchamiento del pico.
- A lo largo del ensayo no se observa desplazamiento en el máximo.
- Debido a los dos puntos anteriores se ha tomado como referencia de la potencia luminosa el valor de pico máximo.
- La potencia luminosa de los LEDs de tipo I se degradan de forma más importante que los LEDs de tipo II. Los LEDs tipo II presentan una degradación del chip con una disminución de la resistencia en paralelo que no afecta a la potencia luminosa a 600 mA.
- Los LEDs que trabajan en continua se degradan más que los que trabajan de forma cíclica.
- A medida que aumenta la temperatura los LEDs se degradan más.

5.3 Microscopia óptica

En el siguiente punto se hace un seguimiento de la evolución de los encapsulados de los diodos durante los ensayos porque se degradaron afectando a su luminosidad.

Para ello vamos a analizar cómo se degradan cada uno de los tipos de LEDs y para ello se va a mostrar la evolución de la degradación del encapsulado.

En las Figuras se muestran el estado inicial de los encapsulados de tipo I y II:

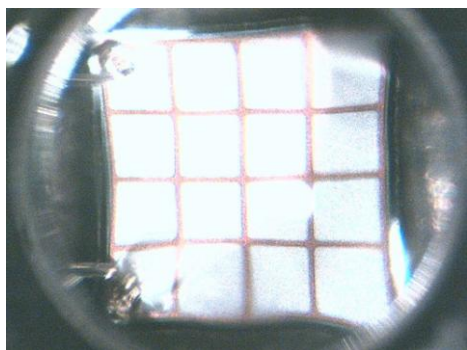


Figura 5.33. Estado inicial del LED Tipo I (16x)

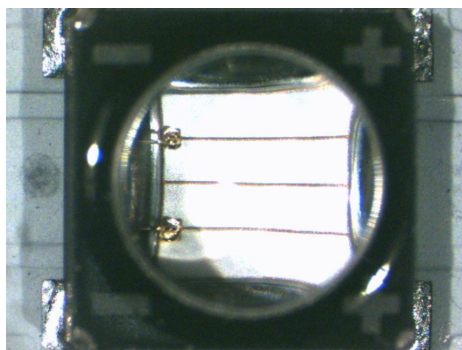


Figura 5.34. Estado inicial del LED Tipo II (10x)

A lo largo del ensayo se realizaron diferentes fotos de microscopia óptica con el objetivo de evaluar la influencia de la degradación del encapsulado en la potencia luminosa.

- Seguimiento del diodo 3 del Tipo I a 60°C e inyección de corriente continua:

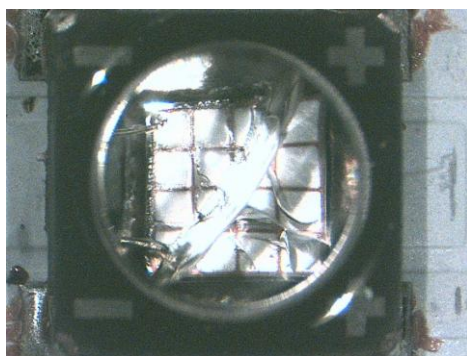


Figura 5.35. LED 3 Tipo I tras 1080 horas

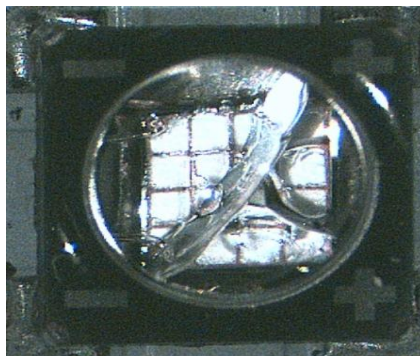


Figura 5.36. LED 3 Tipo I tras 1500h

Esta degradación en forma de cracking se observa a 60°C en todos los LEDs de Tipo I que funcionan en continua.

- Seguimiento del diodo 4 del Tipo I a 60°C e inyección de ciclos de corriente:

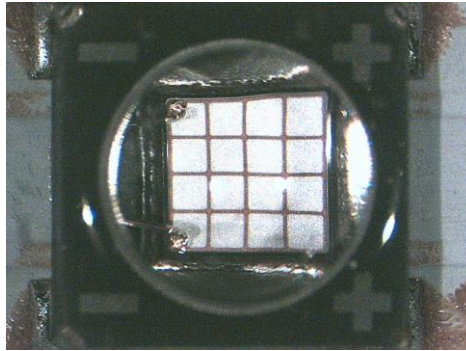


Figura 5.37. LED 4 sin degradación tras final de ensayo tras 1500 horas

En los LEDs de tipo I a 60°C que funciona en ciclos no se observa la rotura en forma de cracking en las 1500 horas que ha durado el ensayo.

- Seguimiento del diodo 2 del Tipo II a 60°C e inyección de corriente continua:

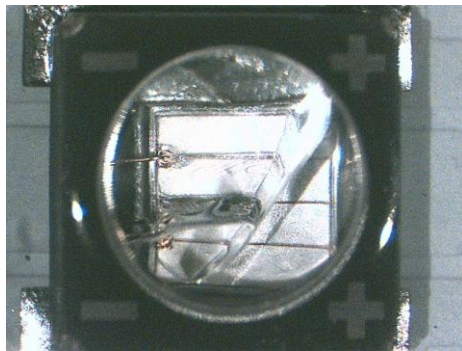


Figura 5.38. LED 2 Tipo II tras 1080 horas de ensayo

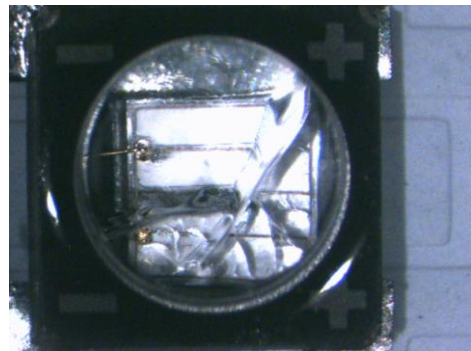


Figura 5.39. LED 2 Tipo II tras 1500 horas de ensayo

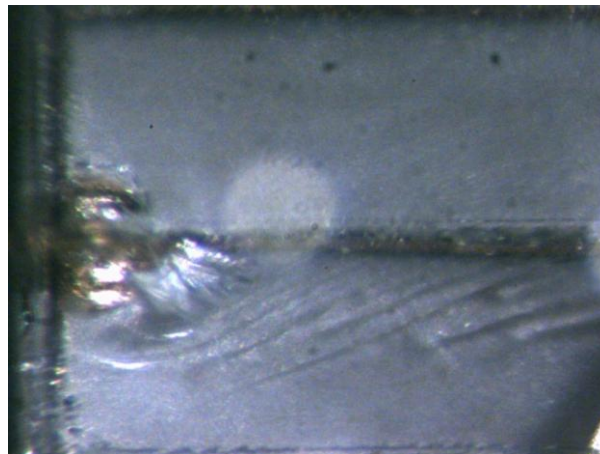


Figura 5.40. Wire bonding del LED 2 Tipo II tras 1500 horas de ensayo

Esta degradación en forma de cracking se observa a 60°C en todos los LEDs de Tipo II que funcionan en continua.

- Seguimiento del diodo 4 del Tipo II a 60°C e inyección de ciclos de corriente:

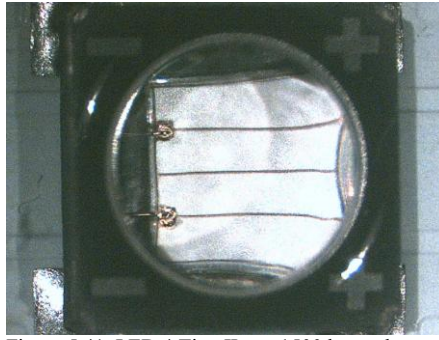


Figura 5.41. LED 4 Tipo II tras 1500 horas de ensayo

En los LEDs de tipo II a 60°C que funciona en ciclos no se observa la rotura en forma de cracking en las 1500 horas que ha durado el ensayo.

En los ensayos a 75°C y 90°C la degradación del encapsulado es del mismo tipo que a 60°C pero se produce de forma más rápida a medida que aumenta la temperatura. A continuación mostramos unas fotos de microscopia de los LEDs a estas temperaturas.

- Seguimiento del diodo 8 del Tipo I a 75°C e inyección de corriente continua:

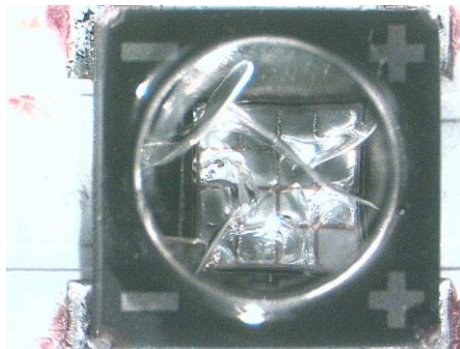


Figura 5.42. LED 2 Tipo I tras 780 horas de ensayo

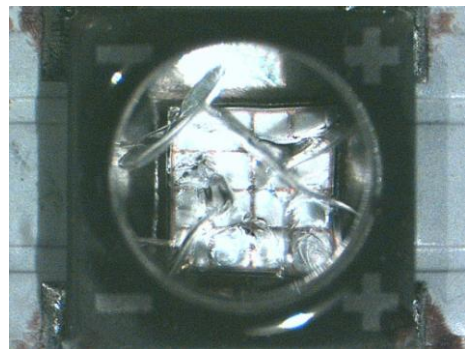


Figura 5.43. LED 2 Tipo I tras 1080 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 10 del Tipo I a 75°C e inyección de ciclos corriente:

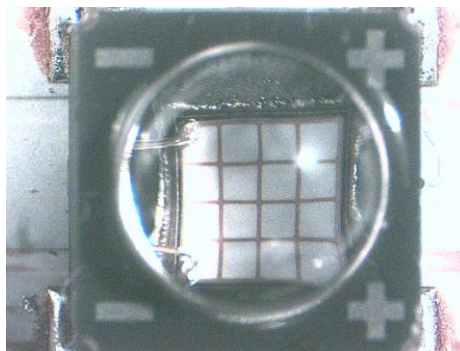


Figura 5.44. LED 10 Tipo I tras 1080 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 8 del Tipo II a 75°C e inyección de corriente continua:

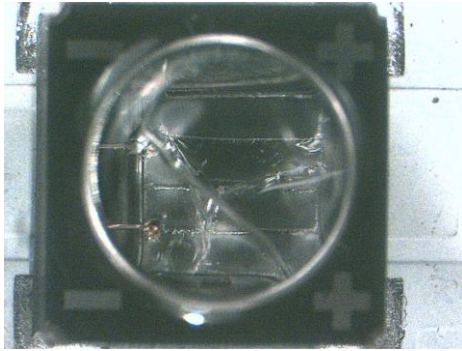


Figura 5.45. LED 8 Tipo II tras 780 horas de ensayo

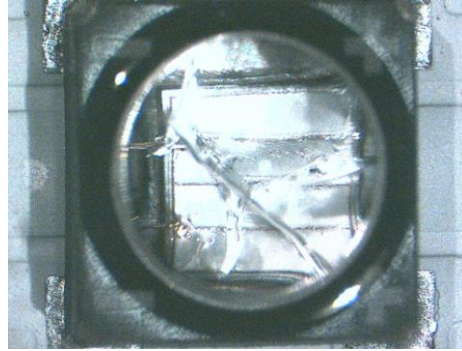


Figura 5.46. LED 8 Tipo II tras 1080 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 12 del Tipo II a 75°C e inyección de ciclos de corriente:

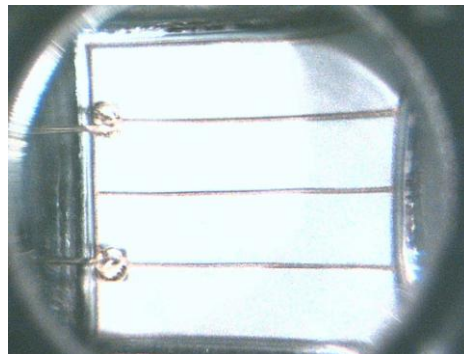


Figura 5.47. LED 12 Tipo II tras 1080 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 11 del Tipo I a 90°C e inyección de corriente continua:

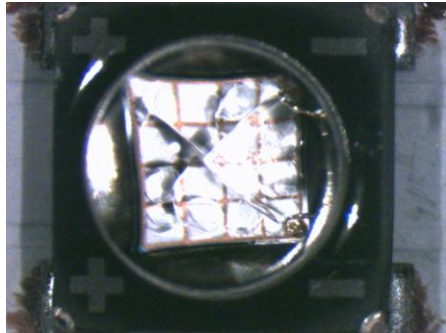


Figura 5.48. LED 11 Tipo I tras 449 horas de ensayo

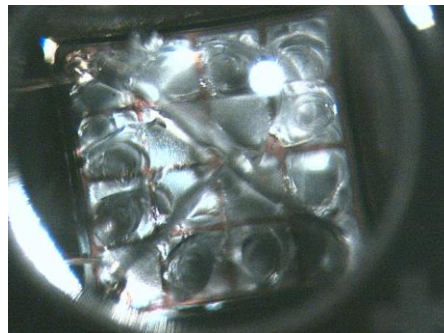


Figura 5.49. LED 11 Tipo I tras 1380 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 7 del Tipo I a 90°C e inyección de ciclos de corriente:

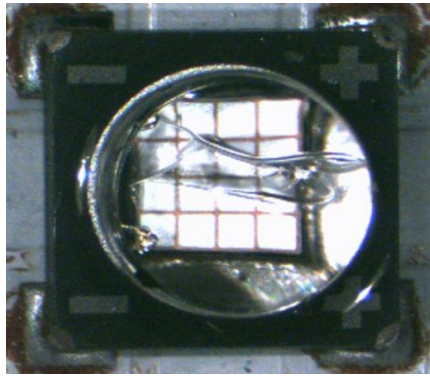


Figura 5.50. LED 7 Tipo I tras 449 horas de ensayo

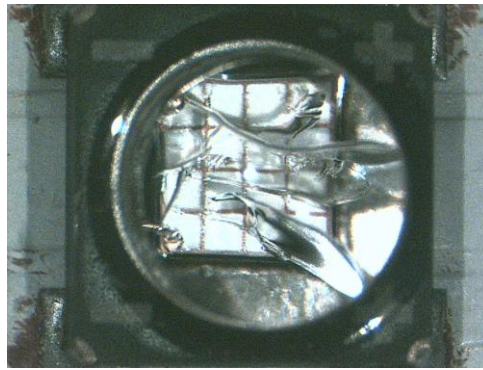


Figura 5.51. LED 7 Tipo I tras 1380 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 6 del Tipo II a 90°C e inyección de corriente continua:

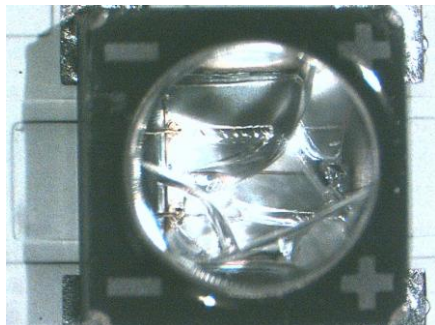


Figura 5.52. LED 6 Tipo II tras 765 horas de ensayo

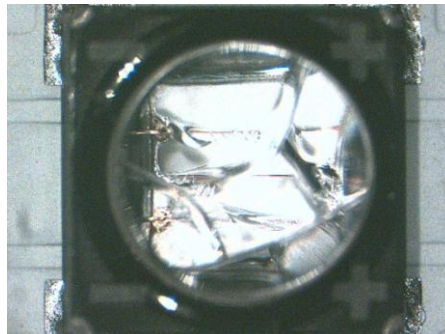


Figura 5.53. LED 6 Tipo II tras 1380 horas de ensayo

- Seguimiento del diodo 7 del Tipo II a 90°C e inyección de ciclos de corriente:

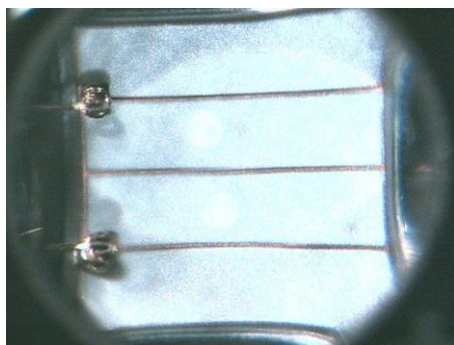


Figura 5.54. LED 7 Tipo II tras 1052 horas de ensayo



Figura 5.55. LED 7 Tipo II tras 1380 horas de ensayo

La rotura de la silicona de los LEDs es debida al diferente coeficiente de dilatación térmico del chip (aproximadamente 5ppm/°C) y la silicona (aproximadamente 200ppm/°C) que produce un stress termomecánico en el interfaz de ambos produciendo una rotura que comienza en la zona más débil que es el wirebonding y se extiende de extremo a extremo del chip.

Además de los “cracking” aparece otro defecto denominado delaminación. El proceso de delaminación comienza por la separación de la silicona de la zona más caliente del chip que son las metalizaciones, especialmente en el lado más cercano a los wirebonding donde la corriente es mayor, ver siguiente Figura. La segunda fase es la delaminación completa de la silicona del chip delimitada por las líneas calientes de las metalizaciones, Figura .

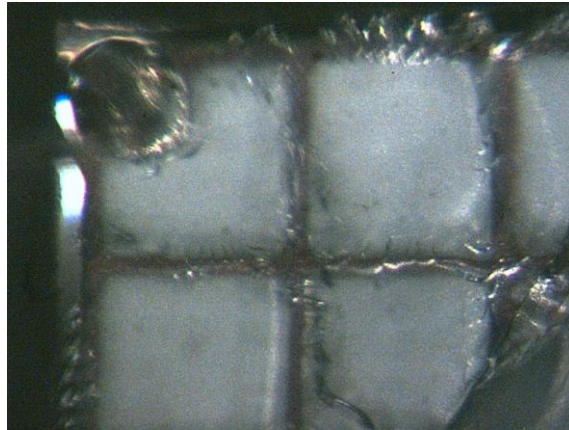


Figura 5.56. Detalle Silicona en malla metálica tras 1500 horas



Figura 5.57. Formación de delaminación.

En la siguiente tabla hemos realizado un resumen del análisis de las fotografías de microscopia óptica que hemos realizado en los diferentes ensayos.

Número de LED	Tipo	Temperatura(°C)	Ciclo o Continuo	Tiempo Cracking (Horas)	Potencia luminosa al final
3	I	60	Continuo	< 1080	0,66
4	I	60	Ciclo	NO >1080	0,77
2	II	60	Continuo	< 1080	0,88
4	II	60	Ciclo	NO >1080	0,92
8	I	75	Continuo	520 - 780	0,44
10	I	75	Ciclo	NO >1080	0,61
8	II	75	Continuo	< 1080	0,91
12	II	75	Ciclo	NO >1080	0,95
11	I	90	Continuo	449	0,32
7	I	90	Ciclo	449-1080	0,6
6	II	90	Continuo	< 765	0,77
7	II	90	Ciclo	1052-1380	0,95

Tabla 5.14 Cálculos de tiempo de cracking y potencia luminosa al final relativa a la potencia inicial

Se ha evaluado la degradación del encapsulado de los LEDs de tipo I y II. Las principales conclusiones que podemos destacar son:

- El mecanismo de degradación del encapsulado de ambos tipos de LEDs es el mismo finalizando en una rotura de la silicona en forma de cracking. La forma del cracking depende de la posición del wirebonding y de la metalización del chip.
- La rotura en forma de cracking de los LEDs de tipo I se produce antes que la de los LEDs de tipo II.
- La potencia luminosa que pierden los LEDs de tipo I es mayor que la que se produce en los LEDs de tipo II. La rotura del encapsulado influye de forma muy importante en la potencia luminosa.
- El tiempo en que se produce el cracking disminuye con la temperatura del ensayo acelerado.
- Los LEDs que trabajan con ciclos de corriente tienen la rotura del encapsulado más tarde que los que trabajan a corriente continua. De hecho en los ensayos a 60°C y 75°C solo se han producido cracking en los LEDs que trabajan en continua.

5.4 CONCLUSIONES CAPITULO 5

En éste capítulo se han analizado tres tipos de resultados que estudian la degradación de los LEDs:

- En primer lugar se hace un análisis de las curvas I-V de 12 LEDs donde se obtienen conclusiones sobre cómo afectan los dos tipos de ciclo de trabajo en cada tipo de diodo.
- En segundo lugar, se analiza la espectrometría de los 12 LEDs. Primero se realizan unas tablas donde se analiza: número de cuentas, longitud de onda y FWHM. Después se analizan unas gráficas que muestran el número de cuentas por longitud de onda, y la potencia de pico relativa.
- Para concluir se hace una microscopía óptica de 12 LEDs tomando fotografías de los encapsulados en determinados instantes de tiempo para ver la evolución de la degradación.

Como conclusiones generales de los ensayos acelerados podemos destacar:

- La temperatura tiene una importante influencia en la degradación de los LEDs. Los LEDs a altas temperaturas, 90°C, se degradan de forma importante con respecto a medias y bajas temperaturas.
- La tecnología de metalización del chip influye de forma importante en la degradación del encapsulado. Dos tecnologías de metalización diferentes presentan tiempos de rotura de encapsulado muy diferentes.
- El modo de inyección de corriente del LED influye en la degradación del encapsulado. La inyección de corriente cíclica (30 segundos ON y 30 segundos OFF) retrasa la rotura del encapsulado con respecto a la inyección continua de forma importante.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

6 Conclusiones

En este proyecto fin de carrera se estudia la fiabilidad de diodos ultravioleta mediante ensayos acelerados, como parte del estudio de la tesis doctoral del profesor Francisco José Arqués Orobón “Contribución al análisis y detección de contaminantes en las aguas mediante métodos de fluorescencia”.

Como punto de partida los diodos LEDs UV surgen como una evolución del LED de luz blanca para poder ser aplicados a la práctica por medio de diferentes técnicas, reemplazando dispositivos más tradicionales como las lámparas UV. Las ventajas de los LEDs de ultravioleta con respecto a las lámparas convencionales son su menor tamaño, mayor rendimiento energético y mayor fiabilidad. El uso en el campo de la investigación de estos dispositivos favorece su evolución y mejora constante para la obtención de mejores resultados en la práctica. En particular los LEDs que se estudian en este Proyecto Fin de Carrera se han seleccionado para su uso en la detección de hidrocarburos en agua mediante técnicas de fluorescencia.

Los LEDs de ultravioleta son unos dispositivos innovadores por lo que todavía es una tecnología en constante evolución. Esto hace que el análisis de fiabilidad sea especialmente importante.

Para la evaluación de fiabilidad es necesario el disponer de datos de tiempos de fallos que se utilizaran con modelos matemáticos que han sido descritos en la memoria. La larga vida de los dispositivos hace necesario la utilización de ensayos acelerados para la obtención de los tiempos de fallos en un periodo de tiempo suficientemente cortos.

En este Proyecto Fin de Carrera hemos realizado ensayos acelerados en temperatura. Los ensayos acelerados han consistido en:

- Tres temperaturas diferentes (60°, 75° y 90°). Para ello hemos utilizado tres hornos de temperatura diferentes cada uno de ellos con una de las temperaturas descrita.
- Dos tipos de LEDs del mismo fabricante y similar potencia (3W), longitud de onda (365nm) y máxima corriente (700mA). El encapsulado del LED es el mismo pero el chip y la metalización son diferentes.
- Dos modos de trabajo. Unos LEDs de cada tipo y a cada temperatura van a trabajar con inyección de corriente continua y otros con ciclos de inyección de corriente 30 segundos ON y 30 segundos OFF. En el caso de las inyección de corriente continua la temperatura es mayor y en el caso de los ciclos de corriente la temperatura es menor pero presenta ciclos térmicos que podrían afectar de forma negativa a la fiabilidad.

Paródicamente los ensayos acelerados son interrumpidos y cada uno de los LEDs son evaluados mediante tres técnicas diferentes: curvas I-V, espectrometría y microscopía óptica.

Los principales resultados de estos ensayos fueron:

Curvas I-V:

Las curvas I-V nos dan información de la evolución de la degradación del chip semiconductor. Se realizaron curvas I-V a temperatura controlada obteniéndose las siguientes conclusiones:

- La degradación de la curva I-V es mayor en los LEDs tipo 2 que en los LEDs tipo 1, siendo muy pequeña en los LEDs tipo 1.
- La degradación de la curva I-V de los LEDs es atribuida a una disminución de la resistencia en paralelo que hace que la corriente circule por ella en vez de por el diodo.
- La degradación de la curva I-V no va acompañada por una pérdida de potencia luminosa a 600mA debido a que la degradación de la curva I-V se produce a corrientes menores.
- La degradación de la curva I-V aumenta con la temperatura.
- En todos los ensayos la curva I-V de los LEDs que trabajan en continua se degrada más que los LEDs que trabajan en ciclos de corriente.

Espectrometría:

Mediante la espectrometría evaluamos el espectro luminoso que emite los LEDs que es la característica de calidad más importante. De los espectros realizados a todos los LEDs en diferentes momentos del ensayos podemos destacar que:

- A lo largo del ensayo no se observa ensanchamiento del pico de espectrometría del LED.
- A lo largo del ensayo no se observa desplazamiento de longitud de onda en el máximo de la espectrometría.
- Debido a los dos puntos anteriores se ha tomado como referencia de la potencia luminosa el valor de pico máximo.
- La potencia luminosa de los LEDs de tipo I se degradan de forma más importante que los LEDs de tipo II. Los LEDs tipo II tenían una degradación del chip con una disminución de la resistencia en paralelo que no afecta a la potencia luminosa a 600 mA.
- Los LEDs que trabajan en continua se degradan más que los que trabajan de forma cíclica.
- A medida que aumenta la temperatura los LEDs se degradan más.

Microscopia óptica:

Mediante la microscopía óptica evaluamos la evolución del estado de los encapsulados. Se ha evaluado la degradación del encapsulado de los LEDs de tipo I y II. Las principales conclusiones que podemos destacar son:

- El mecanismo de degradación del encapsulado de ambos tipos de LEDs es el mismo finalizando en una rotura de la silicona en forma de cracking. La forma del cracking depende de la posición del wirebonding y de la metalización del chip.
- La rotura en forma de cracking de los LEDs de tipo I se produce antes que la de los LEDs de tipo II.
- La potencia luminosa que pierden los LEDs de tipo I es mayor que la que se produce en los LEDs de tipo II. La rotura del encapsulado influye de forma muy importante en la potencia luminosa.
- El tiempo en que se produce el cracking disminuye con la temperatura del ensayo acelerado.
- Los LEDs que trabajan con ciclos de corriente tienen la rotura del encapsulado más tarde que los que trabajan a corriente continua. De hecho en los ensayos a 60°C y 75°C solo se han producido cracking en los LEDs que trabajan en continua.

Como conclusiones generales de los ensayos acelerados podemos destacar:

- La temperatura tiene una importante influencia en la degradación de los LEDs. Los LEDs a altas temperaturas, 90°C, se degradan de forma importante con respecto a medias y bajas temperaturas.
- La tecnología de metalización del chip influye de forma importante en la degradación del encapsulado. Dos tecnologías de metalización diferentes presentan tiempos de rotura de encapsulado muy diferentes.
- El modo de inyección de corriente del LED influye en la degradación del encapsulado. La inyección de corriente cíclica (30 segundos ON y 30 segundos OFF) retrasa la rotura del encapsulado con respecto a la inyección continua de forma importante.

Todos estos resultados demuestran la importancia de un análisis de fiabilidad en los dispositivos LEDs de UV de alta potencia destinados a aplicaciones de sensores de hidrocarburos debido a que estos dispositivos son muy novedosos y la tecnología no es estable y está en continuo desarrollo.

De la investigación realizada en este Proyecto Fin de Carrera se abren nuevos campos de trabajo entre los que podríamos destacar:

- Análisis de diferentes ciclos de inyección de corriente.
- Influencia de otros agentes climatológicos como la humedad mediante ensayos en cámaras climáticas con humedad.
- Análisis de otras alternativas de configuración LEDs (varios LEDs en un mismo encapsulado...).
- Propuestas de mejora de encapsulados.

7 COSTES

En este apartado se evalúan los costes económicos necesarios para el desarrollo de este PFC. Se ha hecho una clasificación de los aspectos más importantes que se exponen a continuación:

- **Ordenador y software**
- **Equipamiento**
- **Fungible**
- **Mano de obra**

Ordenador y Software

Para la realización del proyecto se han utilizado dos ordenadores Dell con microprocesador Intel Core i5 y 4GB de memoria RAM.

Con respecto al SW se ha utilizado el sistema operativo Windows 7 de 32 bits, el paquete Office 2010 y el programa de Labview.

ELEMENTO	PRECIO APROXIMADO
Ordenador Dell x2	600 x2
Licencia Windows 7	120
MS Office 2010	400
Labview	500
Total:	2220€

Tabla 7.1

Equipamiento

- Hornos de temperatura para la realización de ensayos:

ELEMENTO	PRECIO APROXIMADO
Horno Binder	2500
Horno Primelec	2500
Horno Selecta	2500
Total:	7500€

Tabla 7.2

- Equipamiento electrónico para caracterización de LEDs:

ELEMENTO	PRECIO APROXIMADO
Multímetro x2	2500 x2
Espectrómetro	2000
Microscopio	1000
Cámara fotográfica	500
Total:	8500

Tabla 7.3

- **Fungible**

Como el material utilizado para la preparación de los ensayos en el laboratorio:

ELEMENTO	PRECIO APROXIMADO
Cables	50
Conectores	20
Radiadores x25	3 x25
Diodos x25	30 x25
Total:	895 €

Tabla 7.4

- **Mano de obra**

Se realizaron sesiones de 4 horas durante 3 días a la semana, esto hace un total de 12 horas semanales. En un mes hace un total de 48 horas.

Si consideramos que el trabajo se realizó durante 6 meses y que se cobra a 35€/h.

$$\text{Total} = 35\text{€/h} * 288 \text{ horas} = 10080 \text{ €}$$

Una aproximación al coste total del proyecto es de:

BLOQUE	COSTE
Ordenador y Software	2220
Equipamiento	16000
Fungible	895
Total:	19.115 €

Tabla 7.5

REFERENCIAS

Artículos de LEDs:

Steigerwald DA, Bhat JC, Collins D, Fletcher RM, Holcomb MO, Ludowise MJ, et al. Illumination with solid state lighting technology. IEEE J Sel Top Quant Electron 2002; 2:310–20.

Steranka FM, Bhat J, Collins D, Cook L, Craford MG, Fletcher R, et al. High power LEDs –technology status and market applications. Phys Status Solidi A 2002; 194:380–8.

Schubert EF, Kim JK, Luo H, Xi J-Q. Solid-state lighting-a benevolent technology. Rep Prog Phys 2006;69: 3069–99.

Aplicaciones de los LEDs UV:

Arques Orobon, F. J. et al. (2013, April). Fluoro-sensing applied to detection and identification of hydrocarbons in inland waters. Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE Intern. Conf. (pp. 193-198).

UV LEDs help detect hydrocarbon contaminants in water. Laser Focus World.
<http://www.laserfocusworld.com/articles/2014/02/uv-leds-help-detect-hydrocarbon-contaminants-in-water.html>.

Artículos de fiabilidad:

Practical Reliability Engineering Patrick O'Connor Wiley, 08/07/2002 - 540 páginas.

Life Cycle Reliability Engineering Guangbin Yang John Wiley & Sons, 02/02/2007 – 517 paginas.

Design for Reliability Dana Crowe, Alec Feinberg CRC Press, 30/04/2001 - 256 paginas.

Distribucion de Weibull - <http://www.weibull.com>

Artículos de fiabilidad de LEDs:

Moon-Hwan Chang , Diganta Das , P.V. Varde , Michael Pecht Light emitting diodes reliability review Microelectronics Reliability, Volume 52, Issue 5, May 2012, Pages 762–782

Vazquez M, Nunez N, Nogueira E, Borreguero A. Degradation of AlInGaP red LEDs under drive current and temperature accelerated life tests. Microelectron Reliab 2010; 50:1559–62.

Meneghini, et al. (2010). Defect-related degradation of Deep-IV-LEDs. Microelectron. Reliab. 50(9), 1538-1542.

Meneghini, M. et al. (2010). Reliability evaluation for Blu-Ray laser diodes. Microelectron. Reliab. 50(4), 467-470.

Grillot PN, Krames MR, Zhao H, Teoh SH. "Sixty thousand hour light output reliability of AlGaInP light emitting diodes". IEEE Trans Dev Mater Reliabvol 6 252 (2006).

Nogueira, E., Manuel Vázquez, and Neftalí Núñez. "Evaluation of AlGaInP LEDs reliability based on accelerated tests." Microelectronics Reliability 49.9 (2009): 1240-1243.

Artículos de ensayos acelerados:

Lawson RW. The accelerated testing of plastic encapsulated semiconductor components. In: 12th Annual reliability physics symposium 1974. p. 243-9.

Peck D Stewart. Comprehensive model for humidity testing correlation. In: 24th Annual reliability physics symposium; 1986. p. 44–50.

Johnson DR, Palmer DW, Peterson DW, Shen DS, Sweet JN, Hanlon JT, et al. Microelectronics plastic molded packaging. Sandia report. SAND97-0162; 1987.